

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES**



**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN  
SISTEMA MICROFÓNICO DE INTEMPERIE  
PARA LA LOCALIZACIÓN DE FUENTES  
SONORAS DISTANTES**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA EN  
LA INDUSTRIA Y EL TRANSPORTE**

**Autor:**

Luis Gascó Sánchez

**Director del Trabajo Fin de Máster:**

Dr. César Asensio Rivera

2014



Tribunal nombrado por la Junta de Escuela de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, el día \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014.

Presidente D. \_\_\_\_\_

Vocal D. \_\_\_\_\_

Secretarios D. \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Máster el \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014

Calificación: \_\_\_\_\_

El Presidente

El secretario



### **Agradecimientos**

*Me gustaría dedicar este Trabajo Fin de Máster a mis hermanas y a mis padres, por su apoyo durante mis años de estudiante de Grado y éste año cómo estudiante de Máster.*

*También me gustaría dedicárselo a Pablo, por haberme sabido escuchar durante el último año en los momentos de máximo estrés.*

*Por otra parte me gustaría expresar mi agradecimiento a todos mis compañeros de la sección de acústica del Grupo I2A2, y LABENAC especialmente a Carlos Escribano por sus consejos de bricolaje que tan necesarios han sido en este proyecto.*

*Se merece una mención especial César Asensio, por la confianza que ha puesto en mí durante este año en el Grupo I2A2 y por sus útiles consejos a la hora de realizar éste proyecto.*

*Por último me gustaría agradecer a los amigos que durante el mes de Junio, Julio y Agosto han hecho las veces de técnicos auxiliares en las medidas, gracias a Berta, Dani, Jorge, Elvira, y Pablo.*

***Luis Gascó Sánchez***

*Pasemos al siguiente nivel*

---

---

---

## RESUMEN

Hoy en día el ruido presente en los aeropuertos se ha convertido en un problema importante en las poblaciones cercanas a éstos por el incremento del tráfico aéreo año tras año. Gracias a que los aviones son cada vez menos ruidosos y el esfuerzo por parte de los gestores aeroportuarios en disminuir el ruido en su entorno los niveles de presión sonora se han rebajado con el paso del tiempo.

A pesar de esa reducción de nivel de presión sonora existen algunas maniobras especialmente ruidosas que generan gran molestia a la población. Una de esas maniobras es el uso del sistema de frenado de reversa. Este sistema consiste en desviar el flujo de aire que sale del motor, produciéndose una rápida reducción de la velocidad, con el inconveniente de la gran generación de ruido. El uso de este sistema está prohibido en los grandes aeropuertos europeos bajo condiciones normales, pero a pesar de eso algunas aeronaves lo utilizan y no son sancionadas por no existir forma de comprobar que la reversa ha sido activada sin acceder a la caja negra del avión.

En el año 2013 la Universidad Politécnica de Madrid patenta un sistema para detectar la activación del freno de reversa mediante procedimientos acústicos, concretamente con técnicas basadas en la estimación de la potencia acústica. Dicho sistema hace uso de dos micrófonos de medida para captar las ondas de presión sonora, y localizar su proveniencia para poder estimar la potencia acústica utilizando un modelo matemático inverso. Esos micrófonos han de estar durante periodos de tiempo indeterminados al aire libre, por ese motivo es necesario el diseño de algún tipo de sistema para proteger la instrumentación de la intemperie.

Aunque existen soluciones comerciales generalistas para la medida de ruido en exteriores, dichas soluciones tienen un coste muy elevado que dificulta que el sistema de detección patentado pueda ser desarrollado comercialmente, por ello la motivación de este proyecto surge con la intención de diseñar elementos que puedan ser utilizados de manera conjunta con el sistema de detección de ruido de reversa para que en un futuro se pueda llegar a comercializar un producto completo con esta tecnología.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y caracterizar desde el punto de vista acústico un sistema microfónico de intemperie, para cuantificar el efecto que provoca el uso del sistema que se va a implementar sobre la localización de eventos sonoros para que posteriormente se pueda valorar si desde el punto de vista técnico el prototipo diseñado puede ser utilizado junto con el sistema de detección de la reversa.

Este Trabajo Fin de Máster se centrará en el diseño y caracterización de un sistema de localización de eventos sonoros, basado en la medida de la diferencia de tiempos de llegada de la onda acústica a dos micrófonos, así como en el diseño y medida del efecto que tiene un sistema de intemperie diseñado específicamente para esta aplicación, con la intención de que sea utilizado en las líneas de investigación abiertas del Grupo de Instrumentación y Acústica Aplicada de la Universidad Politécnica de Madrid.

En el informe primero se hará una introducción en la que se expondrá la base teórica de la localización sonora y los métodos que generalmente se utilizan para su medida. También se realizará un análisis de los sistemas de medición acústica en intemperie para aplicar dichos conocimientos en el diseño que se propondrá más tarde.

A continuación se expondrá la metodología propuesta para la caracterización del sistema implementado, consistente en una combinación de medidas de laboratorio con ensayos in situ.

---

También se definirán los parámetros a definir que se consideran indispensables para conocer el correcto funcionamiento de un sistema de localización.

Posteriormente se realizará un análisis de los resultados obtenidos en las mediciones, realizando comparaciones entre las distintas configuraciones adoptadas y valorando críticamente el funcionamiento del sistema de intemperie diseñado.

Por último, se comentarán las conclusiones obtenidas tras el estudio, desarrollo y análisis de resultados obtenidos en este trabajo fin de máster. También se propondrán trabajos para el futuro que permitan perfeccionar el sistema diseñado frente a las condiciones de intemperie, y que además permitan aumentar su rango de funcionamiento.

**PALABRAS CLAVE:** Localización sonora, sistemas de intemperie, detección de eventos sonoros.



---

## ABSTRACT

Air traffic is increasing every year and the noise in airports has become a serious problem for the nearby urban areas. Even so, there has been much progress in reducing aircraft noise. Not only because of airport operators reducing the sound pressure levels in their environment, but also due to airplanes producing less noise.

In spite of this decrease in sound pressure levels, there are still some noisy manoeuvres that affect the people. This is the case of thrust reversal system, which consists of altering the air stream that comes out of the engine, producing a quick speed reduction but a high level of noise. Its use is forbidden under normal circumstances in big European airports. Nevertheless, it is impossible to prove it has been used without checking their black box, so some aircrafts still use it and get no sanctions.

In 2013, the Technical University of Madrid presented a patent to detect the use of thrust reversal system based on acoustic procedures and with techniques which estimated acoustic power. Two measurement microphones are used to capture acoustic waves and locate their source, in order to estimate the acoustic power using an inverse sound propagation model. These microphones would have a special design so they can be used outdoors for long periods of time.

Generalist commercial solutions for measuring outdoor noise have a very high cost, which makes it difficult for the patent to be commercialised. This makes the project a motivation to come out with complementary systems that will in the future make this idea possible to sell.

The aim of this project is to design and define, from an acoustic point of view, a system of outdoor microphones, to quantify the effect of using the system which will be implemented to locate sound events. After this, it will be possible to value if from the technical point of view, the designed prototype can be used with the thrust reversal system.

This final thesis will be focused on designing and defining a system of sound event location based in measuring the difference times in which an acoustic wave arrives to two microphones. Also in the design and the effectiveness of an outdoor system produced for this purpose, with a view for it to be used in the lines of research of *Applied Acoustics and Instrumentation Research Group* of Technical University of Madrid.

The first report will introduce the theoretical bases of acoustic localization and its measuring techniques. The acoustic measuring systems will also be analysed in order to apply the results in the design which will be later introduced.

The proposed methodology for defining the implementing system will be later exposed, consisting of a combination of laboratory measure with in situ practices. The needed parameters to know the correct usage of a location system will also be presented.

Afterwards, the resulting measures will be analysed, making comparisons between the different implemented settings and critically valuing the designed outdoor system.

Finally, the conclusions after the study, develop and analysis of the results, will be commented. Furthermore, some ideas for improving the designed outdoor system and widening its operating range, will be proposed.

**KEY WORDS:** Acoustic localization, Outdoor measurement systems, Sound events detection

---

---

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de empuje de reversa activado. Fuente: Wikimedia .....	1
Figura 2. Diagrama de bloques del procedimiento de detección de ruido de reversa .....	2
Figura 3. Modelo simplificado para la estimación de la distancia. Figura basada en la Figura 3.34 de [12] .....	3
Figura 4. Esquema explicativo de localización sonora .....	4
Figura 5. Estación de monitorado Norsonic Nor1530, con la instrumentación básica para su puesta en marcha.....	7
Figura 6. Kit microfónicos de intemperie distribuidos comercialmente.....	8
Figura 7. Disposición del código IP. Fuente: UNE 20324:93.....	10
Figura 8. Descomposición en vistas del sistema microfónico de intemperie diseñado en el TFM. ....	14
Figura 9. Esquema de la correcta colocación del micrófono en el panel frontal, incluyendo la fotografía de los micrófonos colocados en la caja. ....	15
Figura 10. Detalle de espuma de poliuretano, con agua no absorbida en su superficie. ....	16
Figura 11. Sellado de las juntas de la caja en el interior .....	17
Figura 12. Espuma de poliuretano colocada en el frontal del sistema microfónico. ....	17
Figura 13. A- Perforaciones para evacuación de agua en la parte delantera de la caja de intemperie B- Recubrimiento plástico para frenar la entrada de agua al interior de la caja. ....	18
Figura 14. Detalle de la lámina de PVC dónde se ve la curvatura y un poco de sobrante de cola de poliuretano .....	19
Figura 15. Prensaestopa introducido. Se puede ver la cinta de teflón sobresaliendo en blanco. ....	19
Figura 16. Sistema microfónico de intemperie diseñado completo. ....	20
Figura 17. Sistema microfónico de intemperie sin las soluciones protectoras del frontal. ....	20
Figura 18. Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema de medida.....	21
Figura 19. Esquema ilustrativo sobre los ángulos de cobertura. ....	22
Figura 20. Esquema del ensayo realizado en el Laboratorio de Acústica .....	24
Figura 21. Colocación de los puntos de emisión de ruido en el laboratorio.....	24
Figura 22. Fotografías del ensayo en el laboratorio.....	25
Figura 23. Emplazamiento Nº1 de los ensayos en exterior del TFM.....	27
Figura 24. Emplazamiento Nº2 de los ensayos en exterior del TFM.....	27
Figura 25. A- Sistema de localización en funcionamiento en el emplazamiento Nº2. B- Balizas para marcar las posiciones de emisión de ruido.....	28
Figura 26. Balizas colocadas en el emplazamiento Nº1 en el Campus SUR de la UPM. ....	28
Figura 27. Mapa con la localización del emplazamiento número 1 en el Campus Sur. ....	29
Figura 28. Mapa con la localización del emplazamiento número 2 Guadalajara.....	30
Figura 29. Estimación del error cometido a la hora de colocar el altavoz. ....	31
Figura 30. Resultados de las mediciones realizadas en el Laboratorio con el array microfónico sin sistema de intemperie. ....	32
Figura 31. Resultados de las mediciones realizadas en el Laboratorio con el array microfónico sin sistema de intemperie. ....	33
Figura 32. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento Nº1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 50kHz.....	37
Figura 33. Cálculo erróneo de distancias por una mala predicción del ángulo de proveniencia.....	38
Figura 34. a- Distancia entre array y puntos para el sistema sin el kit de intemperie. b- Distancia entre el array y los puntos para el sistema con el kit de intemperie. ....	39
Figura 35. a- Error asociado a la distancia del array microfónico en porcentaje. b- Error asociado a la distancia del array microfónico con el sistema diseñado en porcentaje. ....	40

---

---

Figura 36. Incremento de error por el uso de la caja. ....	41
Figura 37. Esquema de resultados obtenidos para el emplazamiento N°2 en Guadalajara para una frecuencia de muestreo de 50kHz.....	54
Figura 38. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 48KHz .....	58
Figura 39. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz.....	59
Figura 40. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 24kHz.....	60

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción abreviada de los elementos de código IP .....	10
Tabla 2. Grados de protección contra cuerpos sólidos extraños indicados por la primera cifra característica .....	11
Tabla 3. Grados de protección contra el agua indicados por la segunda cifra característica. ....	11
Tabla 4. Características técnicas de los tableros de MDF.....	15
Tabla 5. Número de mediciones realizadas para las distintas distancias de micrófono y frecuencias de muestreo. ....	25
Tabla 6. Número de medidas en posiciones continuas realizadas para las distancias de micrófono y frecuencias de muestreo.....	26
Tabla 7. Número de series de medidas realizadas para cada frecuencia de muestreo y situación microfónica en cada uno de los emplazamientos elegidos.....	29
Tabla 8. Intervalo de ángulos de cobertura horizontal máxima. ....	34
Tabla 9. Número de ángulos distintos que el sistema en cada una de sus configuraciones es capaz de detectar. ....	34
Tabla 10. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo. ....	38
Tabla 11. Resolución angular media obtenida a partir de las medidas en el laboratorio.....	42
Tabla 12. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo .....	55
Tabla 13. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo, con los grados corregidos. ....	56

---

---

---

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE GENERAL .....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. El Ruido de reversa .....	1
1.2. Estructura de la memoria .....	2
1.3. La localización sonora .....	3
1.3.1. Descripción del campo acústico .....	3
1.3.2. Métodos de procesamiento de señal para localización sonora .....	5
1.4. Medición en exteriores .....	7
1.5. Normativa Internacional IEC 60529 .....	9
1.5.1. Definiciones .....	9
1.5.2. Designaciones .....	9
1.5.3. Grados de protección .....	11
1.6. Objetivos .....	12
<b>2. DISEÑO DEL SISTEMA MICROFÓNICO DE INTEMPERIE .....</b>	<b>13</b>
2.1. Diseño adoptado .....	14
2.2. Materiales utilizados .....	15
2.3. Soluciones al efecto de las condiciones ambientales .....	16
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>21</b>
3.1. Sistema de medida .....	21
3.2. Diseño del experimento .....	22
3.2.1. Parámetros a determinar .....	22
3.2.2. Ensayos en laboratorio .....	23
3.2.3. Ensayos en exteriores .....	26
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
4.1. Resultados Laboratorio .....	31
4.2. Modelo de incertidumbre de las medidas del GPS .....	34
Incertidumbre tipo A .....	35
Incertidumbre tipo B .....	36
Incertidumbre total .....	36
4.3. Resultados en exteriores .....	36
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>43</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>47</b>

---

---

<b>ANEXO I. MÉTODO CLÁSICO DE DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRE.....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO II. MEDIDA EN EL EMPLAZAMIENTO Nº2 .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO III. GRÁFICAS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EMPLAZAMIENTO Nº 1 .....</b>	<b>58</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria describe el trabajo realizado en el Trabajo Fin de Máster del Máster Universitario en Ingeniería Acústica en la Industria y el Transporte, en el que se ha diseñado y caracterizado un prototipo de sistema microfónico de intemperie para utilizarlo conjuntamente con el sistema de localización sonora del detector de ruido de reversa desarrollado por el Director de éste proyecto [1]. Las actividades realizadas en el Trabajo se enmarcan dentro de las líneas de investigación del *Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada (I2A2)*, grupo de investigación adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y reconocido por la Universidad Politécnica de Madrid.

## 1.1. El Ruido de reversa

El empuje de reversa es un sistema de frenado de aeronaves basado en modificar el flujo de los gases de escape de un avión hacia la parte delantera, provocando una desaceleración y emitiendo altos niveles de ruido como efecto secundario. El uso normalizado de la reversa está prohibido en los principales aeropuertos del mundo[2] – como Heathrow en Londres o Barajas en Madrid- por las molestias producidas a los habitantes de entornos aeroportuarios. A pesar de que el uso de la reversa no está permitido, se sigue utilizando debido a la ausencia de un régimen sancionador, hecho relacionado de forma directa a la imposibilidad de la detección de su uso de una forma efectiva, ya que a parte de la instrumentación presente en la aeronave, no existen en los aeropuertos sistemas dedicados a detectar el uso de esta forma de frenado.



Figura 1. Sistema de empuje de reversa activado. Fuente: Wikimedia

Recientemente ha sido patentado por la UPM [3] un procedimiento de detección de ruido de reversa basado en la estimación de la potencia acústica. Este sistema, cuyo diagrama de bloques de funcionamiento se muestra la Figura 2, está compuesto por dos micrófonos que se utilizarán para estimar la distancia, obtenida tras la localización del sistema. Con uno de los micrófonos se medirá el nivel de presión sonora, y a partir de la utilización de un modelo inverso de propagación de la onda acústica en el aire se podrá obtener la estimación de la potencia acústica, que será analizada para saber si se ha utilizado la reversa o no se ha utilizado.

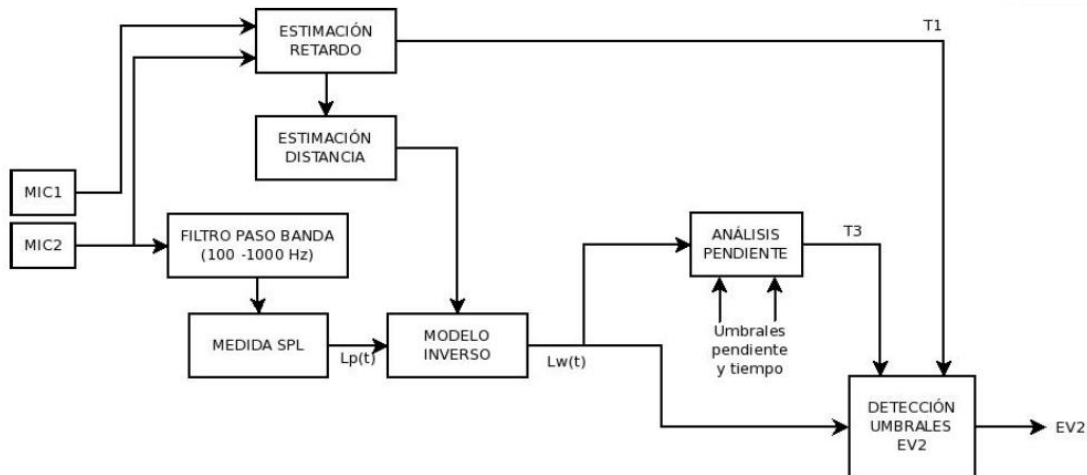


Figura 2. Diagrama de bloques del procedimiento de detección de ruido de reversa

Los dos micrófonos utilizados para la detección, deben situarse en un lugar próximo a la pista de aterrizaje, en la que puede haber presencia de polvo, viento y agua. Por ese motivo es necesario que cuenten con sistemas de resistencia a la intemperie, y que esos sistemas no modifiquen el funcionamiento de la instrumentación, que será lo que se desarrolle en este trabajo.

### 1.2. Estructura de la memoria

A continuación se describen brevemente los contenidos de cada uno de los capítulos que componen la memoria del proyecto.

En el capítulo 1, **Introducción**, se expone el estado del arte tanto de la localización sonora, como los usos que tiene y las investigaciones realizadas hasta el momento, cómo la situación actual de los equipos preparados para trabajar en la intemperie y la normativa que los certifica. Además se trata brevemente la base matemática en la que se sostiene el proyecto.

En el capítulo 2, **Diseño del sistema de intemperie**, se justificará la solución de diseño adoptada, explicando la elección de materiales y los sistemas de protección al viento y al agua que se han decidido implementar.

En el capítulo 3, **Metodología**, se explica la metodología diseñada para realizar las pruebas de caracterización del sistema de localización desarrollado y el sistema microfónico de intemperie. Además se describe y justifica la solución adoptada en el diseño del sistema de intemperie construido.

En el capítulo 4, **Resultados**, se muestran los principales resultados obtenidos de las medidas realizadas. Se realizará una comparación de la situación real en el entorno de medida con las obtenidas por el software desarrollado y se realizará el análisis de incertidumbre del sistema.

En el capítulo 5, **Conclusiones**, se desarrollarán las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados desde un punto de vista crítico y se decidirá el grado de funcionamiento de la solución adoptada. Además se comentarán las futuras investigaciones y desarrollos en los que puede ser utilizado el diseño adoptado y se explicarán las posibles mejoras a aplicar al prototipo para un mejor funcionamiento.

### 1.3. La localización sonora

Las técnicas de estimación de la localización sonora utilizando arrays microfónicos tienen una gran importancia en muchas aplicaciones en la ingeniería, como su uso en robots inteligentes [4]–[6] y sistemas de vigilancia [7]. Desde el punto de vista de la ingeniería acústica, éstas técnicas pueden ser utilizadas para realizar conteo de vehículos [8] y medida de su velocidad [9] información que puede ser utilizada para la mejora de los mapas de ruido, o para el cálculo de otros parámetros dentro del sector aeronáutico, orientación que se tomará en este trabajo. Además estas técnicas son el paso previo para aplicar métodos de *beamforming*, una técnica ampliamente extendida en el sector del transporte para conocer el origen de los ruidos predominantes de un vehículo y realizar control de ruido en esa zona [10], [11].

La localización sonora define la capacidad que tiene un sistema o individuo para determinar la ubicación de una fuente de sonido en el espacio. Existen diferentes técnicas que pueden ser utilizadas para localizar un evento acústico en un campo sonoro. Cada una de estas técnicas está basada en procesar los datos obtenidos con una determinada configuración microfónica. En los siguientes apartados se realizará una descripción básica sobre el fenómeno de la localización, así como los métodos que se han considerado más relevantes para el procesamiento de las señales y la obtención de la dirección de proveniencia del sonido.

#### 1.3.1. Descripción del campo acústico

Como se ha comentado en el apartado anterior, la localización de un evento sonoro es importante de cara a la estimación de la potencia de la aeronave, ya que como se observa en la Figura 3, conociendo la distancia existente entre la recta en la que se está moviendo el emisor de ruido –denotado por “ $d$ ” en la figura–, y el ángulo de procedencia se puede calcular la distancia existente entre el par microfónico y el emisor de ruido, identificada por la letra “ $r$ ”.

Una vez que se tenga esa distancia y el nivel de presión sonora, utilizando un modelo inverso como el mostrado en la ecuación 1, se puede realizar la estimación de la potencia, que no variará con la distancia, por lo que se podrá detectar el momento de accionamiento de la reversa.

$$Lw(t) = Lp(t) + 20 * \log(r(t)) + k \text{ [dB]} \quad (1)$$

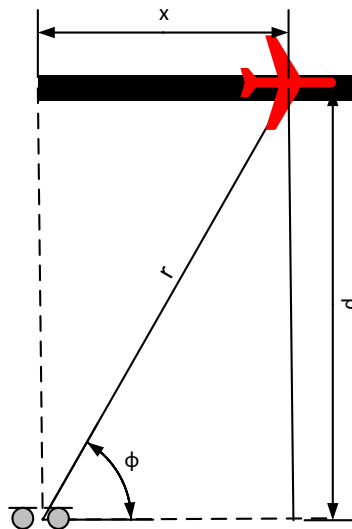


Figura 3. Modelo simplificado para la estimación de la distancia. Figura basada en la Figura 3.34 de [12]

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Como se ha visto la localización ocupa un lugar esencial en el sistema de detección descrito, por ello en la siguiente explicación teórica se va explicar en qué fenómeno físico está basada la localización, considerando un entorno ideal en el que no existen reflexiones y en que se encuentra un emisor de ruido y dos micrófonos separados de éste una distancia  $d_a$  y  $d_b$ , como la mostrada en la Figura 4.

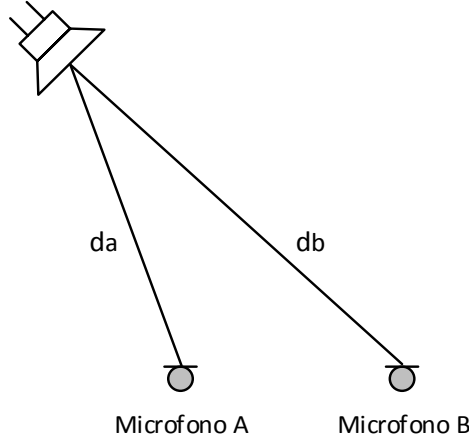


Figura 4. Esquema explicativo de localización sonora

Si un emisor acústico genera una señal  $r(t)$ , las señales captadas por los micrófonos pueden ser simplificadas como las señales mostradas en la ecuación 2 y 3, donde  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$  es la atenuación – o amplificación- debida a la distancia existente entre la fuente y el micrófono. Además el ruido de fondo captado por cada uno de los micrófonos,  $n_a(t)$  y  $n_b(t)$ , se considera no correlacionado entre ellos y la señal de ruido emitida  $r(t)$  [4].

$$a(t) = \alpha_a * r(t) + n_a(t) \text{ [Pa]} \quad (2)$$

$$b(t) = \alpha_b * r(t - \tau_d) + n_b(t) \text{ [Pa]} \quad (3)$$

Cuando la fuente de ruido está mucho más lejos que la distancia existente entre los micrófonos, se puede asumir que los componentes de atenuación de la ecuación 2 y 3 son iguales, por lo que se podrían considerar iguales a uno.

La diferencia temporal entre las dos señales se corresponde a la diferencia de llegada de la onda acústica al micrófono  $a$  y al micrófono  $b$ , y se denota como en la ecuación 4.

$$\tau_d = \frac{d_b - d_a}{c} \text{ [s]} \quad (4)$$

Dónde  $c$  corresponde a la velocidad de propagación del sonido en el aire. Existen publicaciones que demuestran que la humedad y presión atmosférica tienen una ínfima influencia en la velocidad del

## 1. INTRODUCCIÓN

---

sonido [13], y aunque hay documentación que afirma que la temperatura es un factor que modifica la localización sonora – ya que cambia la velocidad del sonido- de manera significativa [14], por simplicidad se ha decidido tomar en los cálculos de éste proyecto el valor constante de 343 m/s, considerando una influencia nula de la temperatura en la velocidad sonora.

Una vez conocida la diferencia temporal entre los dos micrófonos se podrá calcular la estimación de la dirección de llegada del sonido, calculada según la ecuación 5 [15].

$$\cos \phi = \frac{c \cdot \Delta T_{LR}}{x_{LR}} \quad (5)$$

Donde  $x_{LR}$  se corresponde a la distancia entre micrófonos,  $c$  la velocidad del sonido y  $\phi$  el ángulo entre el centro de los dos micrófonos y el evento sonoro y  $\Delta T_{LR} = \tau_d$ .

### 1.3.2. Métodos de procesamiento de señal para localización sonora

Una vez conocida la base científica de la estimación de la dirección de proveniencia de un sonido se van explicar las técnicas más relevantes para el cálculo de la dirección de un evento sonoro en un único plano, aunque cabe reseñar que existen más, utilizándose gran parte de ellas en las técnicas de *beamforming* mencionadas al comienzo del capítulo [16].

Los dos métodos que van a explicarse están basados en la intensidad sonora y la estimación del retardo a partir de métodos de coherencia matemática.

#### *Intensidad Sonora*

La dirección de proveniencia de un evento sonoro puede ser determinada con la medida de la intensidad sonora. Este método, propuesto por primera vez en el año 2001 para la identificación de ruido de aviones [17], propone el uso de tres pares microfónicos enfrentados –una en caso de querer localización en un único plano- para la medida de tres vectores de intensidad que combinados dan lugar a un único vector que apunta a la dirección contraria desde la cual se está emitiendo flujo de ondas acústicas, pudiendo saber la dirección haciendo negativo ese vector.

Esta técnica tiene un inconveniente, no importante en el contexto del proyecto, que es que limita el número de fuentes que pueden seguirse de manera simultánea. Además la presencia de reflexiones y otros ruidos pueden llegar a producir grandes errores a la hora de predecir el ángulo de incidencia, sin olvidar que la presencia de viento puede influir a las medidas de intensidad cometiéndose errores en la estimación de la velocidad, que es necesaria para el cálculo de la intensidad[18].

A pesar de esas limitaciones teóricas, se ha seguido investigando sobre la localización sonora de aeronaves con éste sistema consiguiendo resultados aceptables en el plano horizontal[19] cuando las sondas de intensidad se colocan en altura (para disminuir las reflexiones) , aunque no así en el plano vertical debida al efecto del viento, anteriormente mencionado [19].

A partir de éste método se han propuesto soluciones en las que calculando la coherencia del espectro de potencia medido con una sonda de intensidad en una posición y el espectro calculado a partir de la señal captada por un micrófono independiente alejado de la sonda pueden atenuarse el efecto de las reflexiones o la existencia de otras fuentes consiguiendo aproximaciones de localización más certeras [20].

### Métodos de correlación

El método de coherencia más ampliamente utilizado para la estimación de la *diferencia de tiempos de llegada* –Time Difference of Arrival (TDOA)- es el método de la correlación cruzada, siendo ampliamente utilizado en sistemas de localización para inteligencia artificial [15] y en aplicaciones en automóviles, trenes y aeronaves [1]

En este tipo de procesamiento se analizan iterativamente fragmentos de N muestras captadas por los micrófonos del sistema realizando una correlación cruzada del espectro, conocido espectro cruzado o *cross-spectrum*, esa correlación viene dada por la ecuación 6, en la que  $X_{a-b}(k)$  es la transformada discreta de Fourier de la señal muestreada captada por cada uno de los micrófonos y la multiplicación  $X_a(k) * X_b(k)$  es el espectro cruzado de dichas señales.

$$R_{ab}(\tau) \approx \sum_{k=0}^{N-1} X_a(k) * X_b(k) * e^{\frac{i2\pi k\tau}{N}} \quad (6)$$

Esta correlación va a tener una gran dependencia a las características de correlación inter-muestrales de la señal emisora de ruido. Esta limitación sería un problema en caso de trabajar con señales emitidas correlacionadas como voz y señales paso bajo, en que la correlación inter-muestras es alta. Por ese motivo es necesario aplicar la solución encontrada en la bibliografía que se conoce como *whitened cross-correlation*, como se muestra en la ecuación 7, que esencialmente es una normalización del espectro cruzado anterior.

$$R_{ab}(\tau) \approx \sum_{k=0}^{N-1} \frac{X_a(k) * X_b(k) * e^{\frac{i2\pi k\tau}{N}}}{|X_a(k)| * |X_b(k)|} \quad (7)$$

Una vez calculada la correlación, el TDOA entre los micrófonos a y b puede ser encontrado buscando la posición del máximo en la correlación cruzada, como muestra la ecuación 8.

$$\Delta T_{ab} = \operatorname{argmax}_{\tau} (R_{ab}(\tau)) [s] \quad (8)$$

Dicha ecuación nos proporcionará la diferencia de muestras entre los dos bloques de señal captados, y conociendo la velocidad de muestreo de la señal se podrá calcular la diferencia temporal entre ellas. Finalmente conociendo dicho valor se podrá realizar la estimación de la dirección del sonido con la ecuación 5.

Este método para la estimación del TDOA será el utilizado en el presente proyecto, ya que es esta estimación la utilizada en el sistema de detección de ruido de reversa de aeronaves de la bibliografía [1]. Además la motivación principal de este trabajo es conseguir un prototipo de sistema microfónico de intemperie para utilizarlo en su sistema de medida y tener la oportunidad de seguir realizando

pruebas con éste en vistas a llegar a tener un producto completamente desarrollado por el Grupo I2A2 , hacer uso de la patente obtenida [3] y llegar a obtener un beneficio monetario para la Universidad.

### 1.4. Medición en exteriores

En los últimos 20 años se ha experimentado un aumento de la concienciación de los efectos del ruido en la población. Esto ha sido posible en parte por los esfuerzos realizados por las administraciones públicas, cómo los órganos gestores de la Unión Europea o los gobiernos estatales, publicando disposiciones legislativas a nivel comunitario y nacional, cómo la Directiva 2002/49/CE [21] y el RD 1367/2007 [22]. Estas disposiciones fueron concebidas para evaluar, regular y controlar el ruido ambiental y de ese modo poder disminuir los efectos del ruido en la población que pueden llegar a desencadenar problemas de salud [23]–[26].

Para la evaluación y el control de dicho ruido ambiental se pueden realizar estimaciones mediante simulación de mapas de ruido, pero muchas veces es conveniente realizar medidas de campo para verificar que esas simulaciones están bien dimensionadas y mejorar los modelos de predicción de ruido. Esas medidas generalmente son de larga duración y es necesaria una instrumentación diseñada específicamente para soportar las condiciones ambientales adversas como viento, altas temperaturas y especialmente la presencia de agentes externos como agua y polvo.

Esta instrumentación adaptada a medidas de larga duración en exteriores se distribuye en forma de estaciones de monitorado de ruido, compuestas por uno o varios micrófonos montados dentro de un kit de intemperie y una caja estanca con la instrumentación para almacenar, procesar e enviar mediante conexiones de red la información al órgano administrativo o técnico pertinente. Un esquema de una caja estanca montada puede verse en la Figura 5.

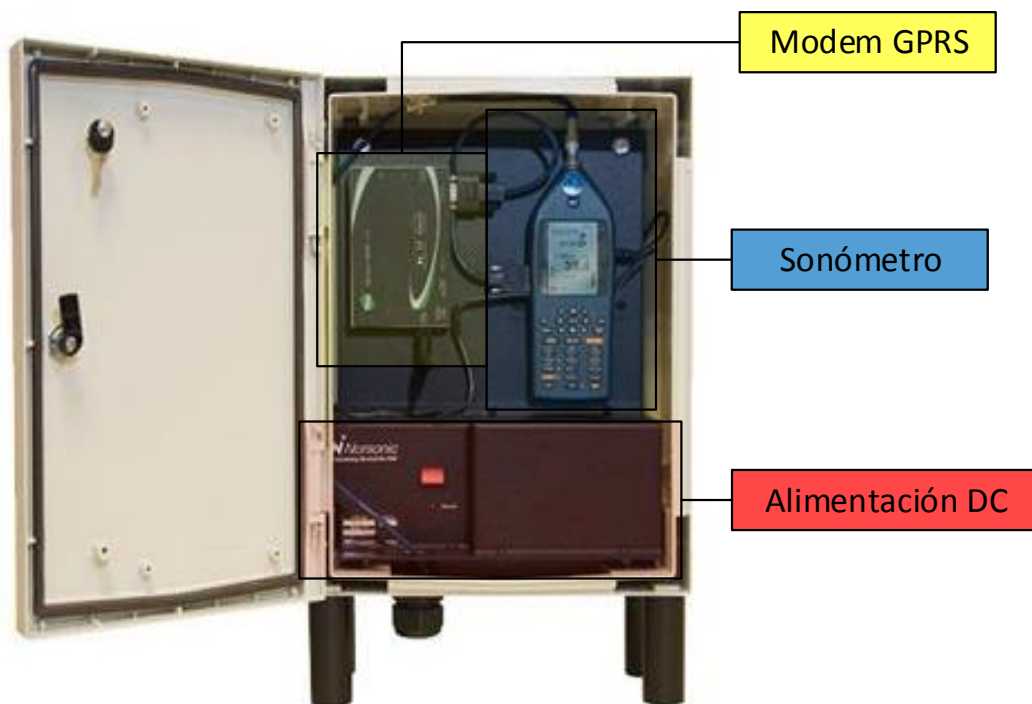


Figura 5. Estación de monitorado Norsonic Nor1530, con la instrumentación básica para su puesta en marcha.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los kit de intemperie que se conexionan al sonómetro tienen diferentes tipos de construcción en función del fabricante. Los elementos comunes de todos ellos son:

- **Antipájaros:** Es un sistema con forma de cono o plástico que se coloca en la parte superior del kit para que no se posen pájaros encima y peligre la integridad del micrófono.
- **Bola antiviento resistente al agua:** Bolas antiviento especiales que garantizan una reducción del ruido turbulento provocado por el viento. Éstas bolas están hechas con espuma de poliuretano de poro abierto, que asegura resistencia al agua al mismo tiempo que transparencia al sonido cuando está seca y mojada como muestran estudios realizados con diferentes soluciones comerciales de kits de intemperie [27].
- **Salida de cable resistente al agua:** Utilizan una salida para el conexionado del micrófono con un sonómetro que asegura la estanqueidad del conector a la lluvia.

Algunas soluciones comerciales que se pueden encontrar se muestran en la Figura 6. En dicha imagen se ven los kit de micrófono de intemperie distribuidos por las empresas *Brüel&Kjaer* [28], *Norsonic* [29] y *Svante* [30], en las que se puede ver que todos tienen los elementos mencionados, y algunos de ellos añaden sistemas de mayor protección como mallas antipolvo, tapas antilluvia – que protegen en mayor medida al micrófono del agua- y dispositivos absorbentes de humedad.

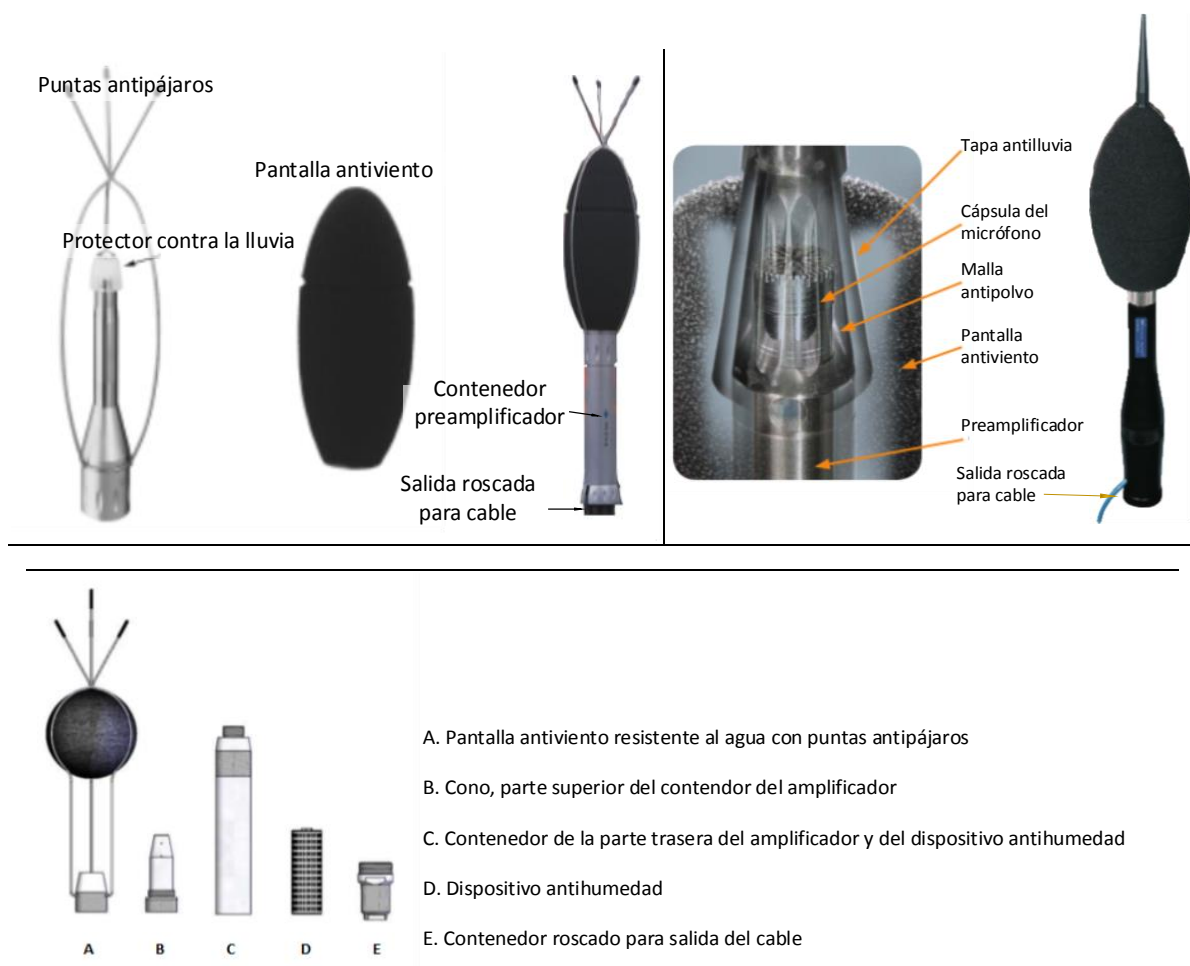


Figura 6. Superior izquierda – Kit de micrófono de intemperie UA-1404 , comercializado por Brüel & Kjær.  
Superior derecha- Micrófono de exterior Nor1216. Comercializado por Norsonic.  
Inferior- Kit de intemperie SA203, comercializado por SVANTEK



Algunos de los fabricantes, como *01dB* [31] o *Norsonic* [29], certifican sus productos para cumplir la normativa internacional de protección de equipos frente a agua y partículas de polvo, que será resumida brevemente en el siguiente apartado.

### 1.5. Normativa Internacional IEC 60529

El estándar internacional IEC 60529 [32] se utiliza para medir el grado de protección de un dispositivo frente a:

- **La protección de personas**, en relación al acceso a partes peligrosas situadas en el interior del dispositivo.
- **La protección de los materiales situados en el interior del dispositivo**, en relación a los efectos perjudiciales por la entrada de cuerpos sólidos extraños.
- **La protección de los equipos situados en el interior del dispositivo**, en relación a los efectos perjudiciales ocasionados por la penetración de agua.

Esta normativa en España tiene el código UNE 20324:93 [33], y cuyo título es “Grados de protección proporcionados por las envolventes (Códigos IP)”. Es la encargada de establecer:

- A. Las designaciones de los grados de protección que anteriormente se han mencionado.
- B. Los requisitos correspondientes de cada designación
- C. Los ensayos a realizar para verificar que el dispositivo satisface los requisitos de la norma.

En este resumen se van a tratar los puntos A y B, puesto que los ensayos a realizar para verificar los dispositivos necesitan de cámaras especiales a las que no se puede tener acceso durante el desarrollo del proyecto, y no son objeto de éste trabajo.

#### 1.5.1. Definiciones

En la normativa se utilizan las siguientes definiciones de forma indistinta, referidas a la protección que otorga la envolvente frente a la protección del equipo a la entrada de agua y polvo en su interior, no definiendo aquellos términos que vayan a ser utilizados para la protección otorgada por la envolvente frente a la protección de personas.

- **Envolvente:** *Elemento que proporciona la protección del material contra ciertas influencias externas y, en cualquier dirección, la protección contra los contactos directos. Las envolventes proporcionan protección a personas y animales contra el acceso a partes peligrosas.*
- **Grado de protección:** *Nivel de protección proporcionada por una envolvente contra el acceso a partes peligrosas, contra la penetración de objetos sólidos extraños y/o contra la penetración de agua y verificado por métodos de ensayo normalizados.*
- **Código IP:** *Sistema de codificación para indicar los grados de protección proporcionados por una envolvente contra el acceso a partes peligrosas, la penetración de cuerpos sólidos extraños, la penetración de agua y para suministrar una información adicional unida a la referida protección.*

#### 1.5.2. Designaciones

El grado de protección proporcionado por una envolvente o dispositivo se indica mediante el código de Protección Internacional (Código IP). Este código está formado por una secuencia alfanumérica

## 1. INTRODUCCIÓN

como la mostrada en la Figura 7, en la que tras escribir las letras IP se le pueden llegar a asignar dos números, del 0 al 6, y dos letras en función del grado de protección que se haya certificado.

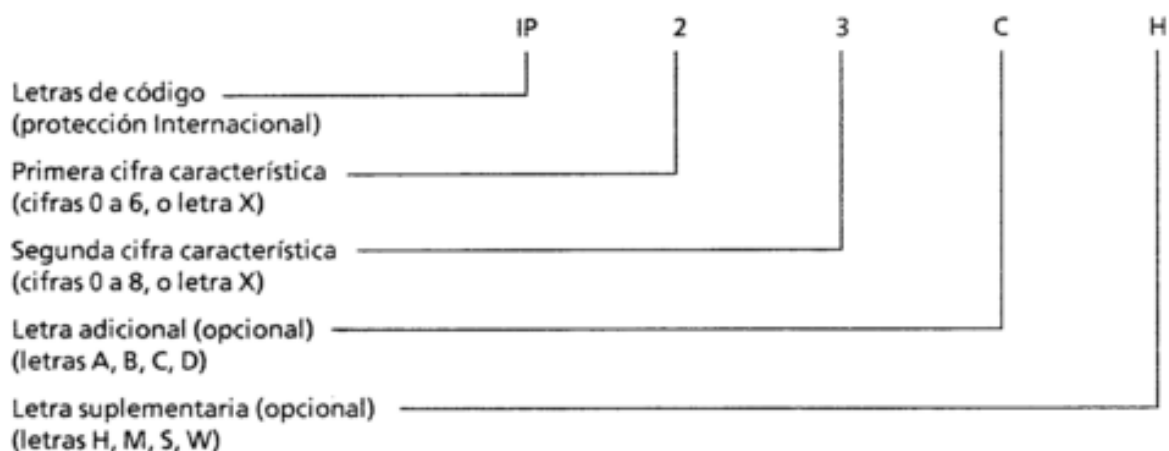


Figura 7. Disposición del código IP. Fuente: UNE 20324:93

Cada uno de los números tiene un significado expresado en la Tabla 1. No se muestra el significado de la protección de las letras pues son opcionales y no se han visto reflejadas en ninguno de los fabricantes, al ser su medida voluntaria.

Tabla 1. Descripción abreviada de los elementos de código IP

Elemento	Cifras o letras	Significado de protección del equipo
Letras del código	IP	
Primera cifra característica		Contra el ingreso de objetos extraños sólidos
	0	No protegido
	1	Partículas $\leq 50$ mm $\varnothing$
	2	Partículas $\leq 12.5$ mm $\varnothing$
	3	Partículas $\leq 2.5$ mm $\varnothing$
	4	Partículas $\leq 1.0$ mm $\varnothing$
	5	Protegido contra el polvo
	6	Totalmente protegido contra el polvo
Segunda cifra característica		Contra la penetración de agua con efectos perjudiciales
	0	No protegido
	1	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua
	2	Protegido contra las caídas de agua con inclinación máx. de 15°
	3	Protegido contra el agua en forma de lluvia
	4	Protegido contra las proyecciones de agua
	5	Protegido contra los chorros de agua
	6	Protegido contra los chorros fuertes de agua
	7	Inmersión temporal
	8	Inmersión continua

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.5.3. Grados de protección

En la Tabla 2 se muestra el grado de protección de una envolvente contra cuerpos sólidos extraños. Los grados de protección enumerados en la tabla serán especificados solamente por la primera cifra característica y no mediante referencia a la descripción abreviada ni a la definición.

Tabla 2. Grados de protección contra cuerpos sólidos extraños indicados por la primera cifra característica

Primera cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	-
1	Protegido contra cuerpos sólidos extraños superiores a 50mm $\varnothing$ y mayores	El calibre-objeto de esfera 50 mm $\varnothing$ , no penetrará completamente la envolvente
2	Protegido contra cuerpos sólidos extraños superiores a 12.5mm $\varnothing$ y mayores	El calibre-objeto de esfera 12.5 mm $\varnothing$ , no penetrará completamente la envolvente
3	Protegido contra cuerpos sólidos extraños superiores a 2.5mm $\varnothing$ y mayores	El calibre-objeto de esfera 2.5 mm $\varnothing$ , no penetrará completamente la envolvente
4	Protegido contra cuerpos sólidos extraños superiores a 1.0mm $\varnothing$ y mayores	El calibre-objeto de esfera 1.0 mm $\varnothing$ , no penetrará completamente la envolvente
5	Protegido contra el polvo	No se impide del todo la penetración del polvo, pero éste no puede penetrar en cantidades suficientes como para perjudicar el funcionamiento del sistema
6	Totalmente protegido contra el polvo	No hay penetración de polvo.

La segunda cifra característica indica el grado de protección proporcionado por las envolventes con respecto a los efectos negativos del equipo debido a la entrada de agua. En la Tabla 3 se muestra el grado de protección contra la penetración de agua, la información mostrada en dicha tabla se expresará exclusivamente por la segunda cifra característica y no por referencia a la descripción abreviada o a su definición

Tabla 3. Grados de protección contra el agua indicados por la segunda cifra característica.

Segunda cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	-
1	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua	Las gotas de agua no deberán producir efectos perjudiciales
2	Protegido contra las caídas de agua con inclinación máx. de 15°	La caída vertical de gotas no debe producir efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinado hasta 15°.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia	El agua que cae en lluvia fina, en una dirección, que tenga, respecto a los dos lados de la vertical un ángulo inferior o igual a 60°, no debe producir efectos perjudiciales
4	Protegido contra las proyecciones de agua	El agua proyectada sobre la envolvente desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
5	Protegido contra los chorros de agua	El agua proyectada en chorros sobre la envolvente desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
6	Protegido contra los chorros fuertes de agua	El agua proyectada en chorros fuertes sobre la envolvente desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales
7	Protegido contra los efectos de la inmersión en agua.	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida temporalmente en agua, con una presión y un tiempo normalizados.
8	Protegida contra la inmersión prolongada	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida continuamente en agua bajo condiciones que se acordarán entre el fabricante y el usuario, pero siendo más severas que la cifra 7.

Para poder asegurar que va a soportar las condiciones ambientales de lluvia y polvo debería conseguir al menos la certificación IP43. Aunque hay que reseñar que los fabricantes deciden aumentar uno o dos grados más de protección, como muestra la información proporcionada por ellos, ya que aseguran IP55 para kits de micrófonos de intemperie [29] y IP54 para cajas estancas para la instrumentación [31]. Aunque hay que reseñar que la realización de estas pruebas al prototipo diseñado queda fuera del alcance de este Trabajo Fin de Máster.

### 1.6. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un prototipo de sistema microfónico de intemperie que pueda ser utilizado durante un tiempo limitado de prueba en situaciones ambientales adversas. Es decir, que una vez finalizado el proyecto pueda ser utilizado en el entorno aeroportuario para realizar pruebas utilizándolo conjuntamente con el sistema de detección de ruido de reversa descrito anteriormente.

Para la consecución de dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Diseñar un sistema de medida utilizando las mismas técnicas de procesado usado en las referencias [1] [12] , que permita la localización espacial de eventos sonoros en el plano horizontal.
- Diseñar una metodología de medida que permita caracterizar el sistema de medida implementado –desde el punto de vista acústico-, para conocer unos parámetros determinados.
- Realizar un estudio comparativo entre el array microfónico con y sin el sistema de intemperie diseñado para llegar a conclusiones, desde un punto de vista crítico, sobre el correcto o incorrecto funcionamiento de la solución adoptada.

Hay que volver a reseñar, que el fin del proyecto es diseñar una estructura de un kit microfónico de intemperie y caracterizarlo para comprobar la idoneidad de la solución. Por ese motivo, en la primera fase de diseño se va a realizar la **caracterización acústica** que permita evaluar el prototipo utilizado, no estando dentro del alcance del TFM la realización de pruebas de resistencia al agua y al polvo, que formarían parte de la siguiente fase de investigación

## 2. DISEÑO DEL SISTEMA MICROFÓNICO DE INTEMPERIE

En el punto 1.4 de esta memoria se han mostrado las soluciones comerciales existentes de envolventes microfónicas y de instrumentación para exteriores. Dichos equipos, diseñados expresamente para la medida de ruido en exteriores, no son los más adecuados para utilizarlas en algunas aplicaciones más concretas, debido a que no son necesarias en muchos casos la totalidad de las prestaciones ofrecidas en dichos productos. Por ejemplo, en el caso de la aplicación del ruido de reversa, no es necesario que la envolvente colocada en la instrumentación haga conservar la omnidireccionalidad del micrófono de medida, ya que sólo nos interesan las ondas acústicas provenientes de la pista de aterrizaje para su procesamiento. Por ese motivo se va a diseñar un kit microfónico que cumpla los siguientes requisitos mínimos:

- **Cajón integrado**, en el que en su interior se puedan colocar los dos micrófonos necesarios para la localización y exista la posibilidad de incluir la tarjeta de adquisición de datos dentro de ésta.
- **Resistencia a la intemperie**: Que proteja la instrumentación frente al polvo y agua de lluvia, de forma que si existiera la posibilidad de adjudicarle una certificación, al menos consiguiera la IP 43. Concretamente:
  - **Evitar acumulación de agua**. Se tiene que plantear una solución a las posibles acumulaciones de agua en la estructura de la caja.
  - **Efecto del viento**. Hay que minimizar el efecto del viento en las cápsulas microfónicas.
  - **Resistencia al agua**. La solución adoptada debe ser resistente al agua y proteger las cápsulas microfónicas de ésta, de manera que no se produzcan filtraciones al interior.
  - **Sellado**. La caja tiene que estar sellada para evitar la entrada de polvo e insectos al interior que pueden provocar un deterioro en la instrumentación.
- **Salida de cables**. Es necesario incorporar algún dispositivo para la salida de cables eléctricos al exterior del prototipo preservando su estanqueidad.
- **Localización**. El sistema debe mantener la calidad y precisión de la localización sonora en la medida de lo posible.

### 2.1. Diseño adoptado

A la vista de las especificaciones mencionadas se ha optado por montar una estructura con las dimensiones mostradas en la Figura 8. Este diseño, con forma de prisma rectangular tiene todas sus caras fijadas exceptuando el frontal, que se inserta en el interior de la estructura a presión consiguiendo de este modo una estructura cerrada, pero accesible al interior para la colocación de los micrófonos y demás instrumentación.

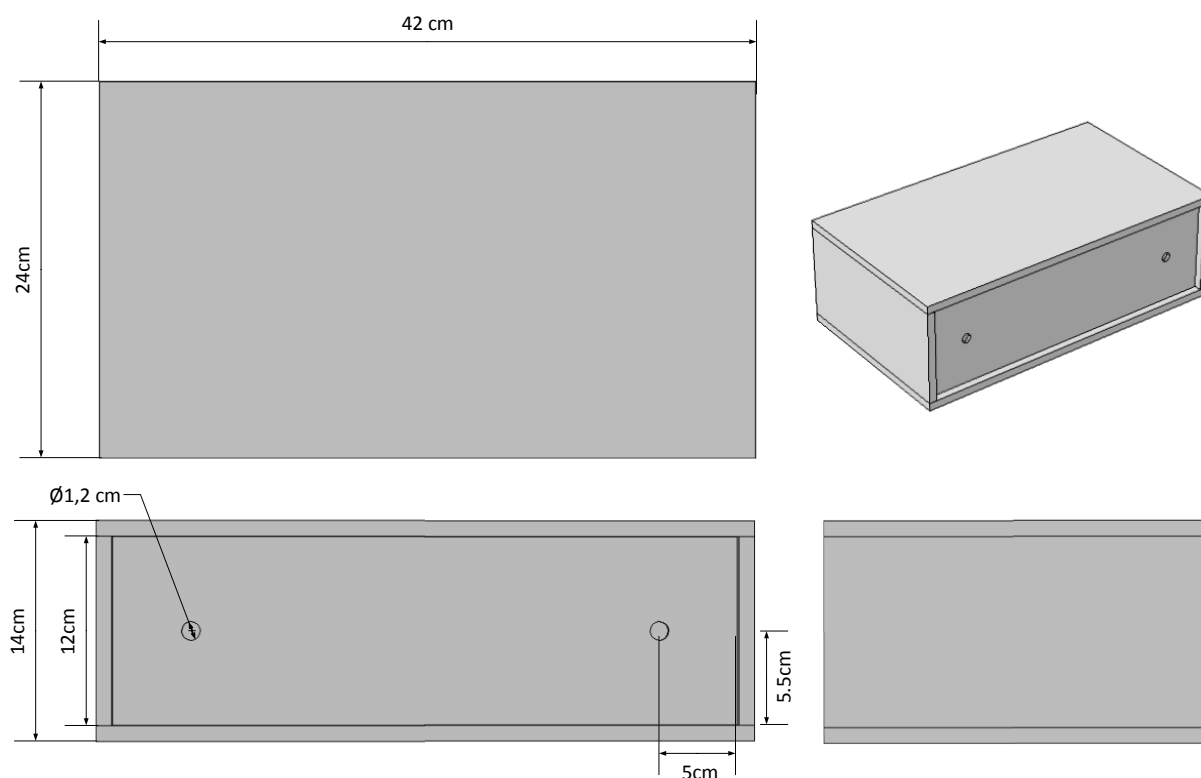


Figura 8. Descomposición en vistas del sistema microfónico de intemperie diseñado en el TFM.

Se ha elegido una distancia entre micrófonos de 30 cm ya que tras analizar los datos de las medidas comentadas en la Tabla 5 sin la caja, el sistema de medida reportaba mejores resultados. No se ha aumentado la distancia, aun conociendo que aumentaría la cobertura horizontal máxima debido a que se consideraba requisito idear un sistema compacto y fácil de transportar.

Los micrófonos de medida, de media pulgada, se insertan dentro de los orificios del panel frontal – también de media pulgada- de manera que no sobresalgan de éste, como esquematiza la Figura 9. Esto se hace así para que no halla elementos sólidos que modifiquen la onda acústica desde su emisión hasta su recepción, además de conseguir que gran parte de la cápsula microfónica esté protegida del agua, polvo y viento.

## 2. DISEÑO DEL SISTEMA MICROFÓNICO DE INTEMPERIE

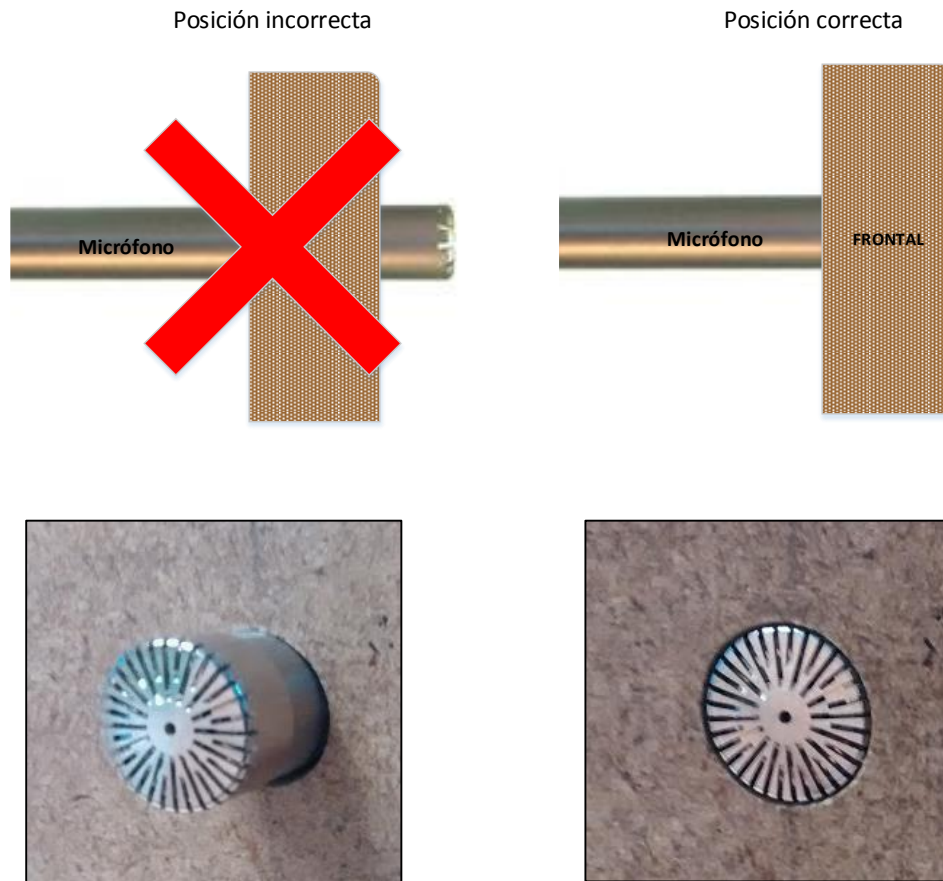


Figura 9. Esquema de la correcta colocación del micrófono en el panel frontal, incluyendo la fotografía de los micrófonos colocados en la caja.

### 2.2. Materiales utilizados

Para el montaje del prototipo del sistema microfónico de intemperie se han utilizado los siguientes materiales:

- **Madera**

Para el montaje de la caja se ha decidido utilizar tableros de MDF, *Medium-density fibreboard*. Aunque los aglomerados no son el tipo de madera más apropiado para montajes de intemperie [34], los tableros adquiridos tienen un tratamiento hidrófobo que provoca una disminución en la absorción de agua cuando son sumergidos, con el consiguiente decremento del hinchamiento de la madera provocado por ésta, como se muestra en la Tabla 4 [35].

Tabla 4. Características técnicas de los tableros de MDF

Parámetros	MDF Standard (10mm)	MDF hidrófugo (10mm)
Densidad media(kg/m <sup>3</sup> )	750	750
Hinchamiento en agua en 24 horas (%)	15%	10%
Contenido de humedad (%)	4-9%	4-7%

- **Material antiviento/antilluvia**

Se ha utilizado *espuma de poliuretano de poro abierto* para proteger las cápsulas microfónicas de la intemperie. Esta espuma, utilizada como protector de lluvia y viento en los modelos comerciales, tiene características de secado rápido, que permita que pueda ser utilizado en poco tiempo una vez que la lluvia cese, y sus poros permiten un drenaje rápido y la circulación de aire, siendo a efectos prácticos *invisible* a las ondas acústicas.

Además, cómo se puede ver en la Figura 10, cuando el agua que cae sobre ella no tiene presión suficiente, el agua no penetra dentro de la espuma, escurriéndose por su superficie.



Figura 10. Detalle de espuma de poliuretano, con agua no absorbida en su superficie.

- **PVC**

Se han utilizado láminas de *policloruro de vinilo* (PVC), material muy resistente al agua y la corrosión, para proteger las zonas más expuestas de la estructura.

### 2.3. Soluciones al efecto de las condiciones ambientales

Para evitar la entrada de polvo y agua en el interior de la envolvente diseñada se han aplicado las siguientes soluciones:

#### *Sellado*

Debido a que uno de los requisitos imprescindibles es frenar la entrada de agua, se han sellado las juntas de la madera en el interior, como muestra la Figura 11. El sellado se ha realizado con cola de poliuretano para madera.

Este adhesivo ofrece una gran resistencia de encolado y soporta factores como el agua y los cambios de temperatura. Además tiene la función de rellenar las juntas encoladas ya que en el proceso de secado la cola se expande, por ello también se utilizó en el montaje de la estructura de la caja, consiguiendo que todas las juntas estén rellenas de este material y logrando aislar la parte exterior de la caja con el interior.





*Figura 11. Sellado de las juntas de la caja en el interior*

### *Frontal*

Para evitar el contacto directo de la cápsula de los micrófonos con el aire y la intemperie, se ha colocado la espuma de poliuretano de 15mm, mencionada en el apartado anterior, en todo el panel frontal, permitiendo que llegue la onda acústica sin mucha modificación – y permitiendo que no disminuya la correlación entre las señales recibidas por cada uno de los micrófonos- y consiguiendo que el agua que absorba la esponja se vaya precipitando a la parte inferior.



*Figura 12. Espuma de poliuretano colocada en el frontal del sistema microfónico.*

### *Drenaje*

En la base de la zona delantera del kit de intemperie, se ha practicado tres orificios, mostrados en la Figura 13A. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Que permiten que el agua que se vaya precipitando por la espuma de poliuretano vaya drenándose al exterior.

Debido a que el frontal está introducido a presión y no sellado, podría entrar agua por la junta inferior cuando el agua cae. Por ese motivo se ha añadido un recubrimiento de plástico que asegure que todo el agua que descienda hacia la parte inferior, sea dirigida hacia las perforaciones anteriormente mencionadas. Este plástico no influirá en el comportamiento acústico de la caja, ya que los orificios practicados en el frontal para colocar los micrófonos no son cubiertos con el plástico, como se ve en la Figura 13B.



*Figura 13. A- Perforaciones para evacuación de agua en la parte delantera de la caja de intemperie  
B- Recubrimiento plástico para frenar la entrada de agua al interior de la caja.*

### *Protección superior*

Puesto que la superficie expuesta en la parte superior del sistema de intemperie es amplia, en caso de lluvia podría llegar a acumularse agua y ser absorbida lentamente por la madera, a pesar de estar tratada hidrófugamente y barnizada, provocando un deterioro notable a medio plazo.

Para ello se ha colocado una plancha de PVC con una ligera pendiente, mostrado en la Figura 14, que permitirá que las gotas de lluvia resbalen hacia el suelo. Hay que mencionar que este agua no será absorbido por la base de la caja por la existencia de cuatro soportes que la elevan unos centímetros del suelo.

Cómo se ha hecho con los demás componentes del sistema, la plancha se ha adherido con cola de poliuretano para evitar que existan zonas no selladas.



*Figura 14. Detalle de la lámina de PVC dónde se ve la curvatura y un poco de sobrante de cola de poliuretano*

### **Salida de cables**

Se ha colocado un *prensaestopa*<sup>1</sup> en la zona posterior del sistema de intemperie para la salida segura de los cables de la instrumentación. Para evitar la filtración de agua por la ranura practicada en la madera se ha utilizado cinta de teflón, usada generalmente para evitar la salida de agua en las juntas de tuberías, como muestra la figura



*Figura 15. Prensaestopa introducido. Se puede ver la cinta de teflón sobresaliendo en blanco.*

Para finalizar, en la Figura 16 se muestra el sistema microfónico de intemperie diseñado ya finalizado, con todos los elementos mencionados integrados. Además en la Figura 16. Sistema microfónico de intemperie diseñado completo. se ve el detalle de cómo quedan colocados los micrófonos en el sistema real.

---

<sup>1</sup> Es un dispositivo mecánico que permite pasar cables del interior al exterior de la caja garantizando el nivel de protección (IP) de la envolvente donde va a ser instalado.

---



## 2. DISEÑO DEL SISTEMA MICROFÓNICO DE INTEMPERIE

---



*Figura 16. Sistema microfónico de intemperie diseñado completo.*



*Figura 17. Sistema microfónico de intemperie sin las soluciones protectoras del frontal.*

### 3. METODOLOGÍA

Se ha establecido un marco metodológico en el que a partir del diseño de un sistema de medida se han definido una serie de ensayos que permitirán caracterizar el efecto de la caja de intemperie diseñada en la localización de eventos sonoros.

En esta sección, en primer lugar, se va a mostrar la base teórica de funcionamiento del sistema de medida implementado. A continuación se hablará sobre el diseño del experimento escogido, definiendo los parámetros que van a ser calculados a partir de la información obtenida en las medidas, así como el tipo de ensayos a realizar. Por último se explicará el diseño elegido para la caja de intemperie, explicando las soluciones elegidas para que el prototipo pueda ser utilizado en la aplicación final prevista.

#### 3.1. Sistema de medida

Es importante el diseño de una herramienta que funcione a tiempo real y permita medir exactitud la localización de los eventos sonoros individuales presentes en el escenario de medida. Esta herramienta, diseñada en el entorno de programación gráfica LabVIEW, utilizará la información obtenida de dos micrófonos conectados a una tarjeta de adquisición de datos para mostrar la información al usuario por pantalla, al mismo tiempo que se almacena en un archivo del PC.

El esquema de funcionamiento del sistema de medida se muestra en la Figura 18. En la parte superior se representa el conexionado de los dos micrófonos, denotados como L y R, a la tarjeta de adquisición de datos, que se configurará para muestrear las señales eléctricas provenientes del micrófono a una frecuencia de muestreo  $f_m$  que serán enviadas al PC.

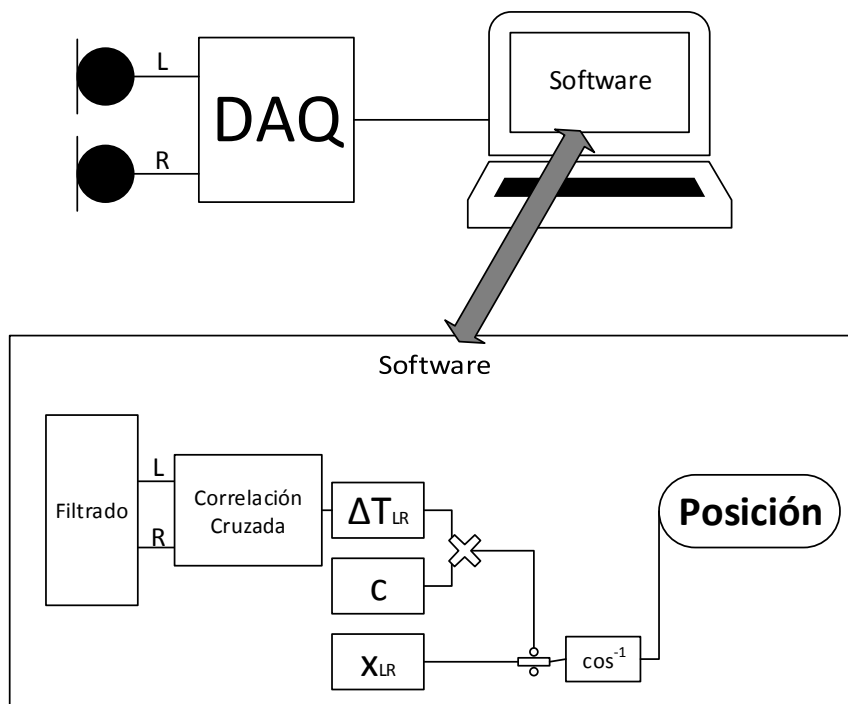


Figura 18. Diagrama de bloques de funcionamiento del sistema de medida.

En la parte inferior de la figura se puede ver el diagrama de bloques con la algoritmia del programa desarrollado. En primer lugar, las señales L y R pueden ser filtradas para analizar exclusivamente una zona de frecuencia del espectro. A continuación se comparan las señales en bloques de N muestras mediante la correlación cruzada en el dominio temporal, obteniendo un valor  $R_{LR}$ , que será transformado en diferencia temporal en segundos,  $\Delta T_{LR}$ , mediante cálculos matemáticos. Por último se realizarán los cálculos pertinentes para obtener el ángulo de incidencia mediante la ecuación 4.

## 3.2. Diseño del experimento

### 3.2.1. Parámetros a determinar

Para caracterizar el sistema de intemperie, desde el punto de vista de la localización sonora, se van a definir unos parámetros que permitirán saber con qué precisión y calidad está funcionando el montaje elegido. Estos parámetros van a caracterizar la calidad del sistema localizando eventos en el plano horizontal, ya que es dónde se van a producir los eventos sonoros en su aplicación final. De este modo se van a determinar los siguientes parámetros:

- **Ángulo de cobertura horizontal máxima:** Es el ángulo máximo dentro del intervalo  $[-90\ 90]$  grados que el sistema de medida es capaz de detectar.
- **Ángulo de cobertura horizontal efectiva:** Lo definimos como el ángulo que el sistema de medida es capaz de detectar sin cometer error en la predicción. Este ángulo siempre es menor que en ángulo de cobertura horizontal máxima.

En la Figura 19 se muestra el esquema conceptual de los ángulos de cobertura horizontal definidos.

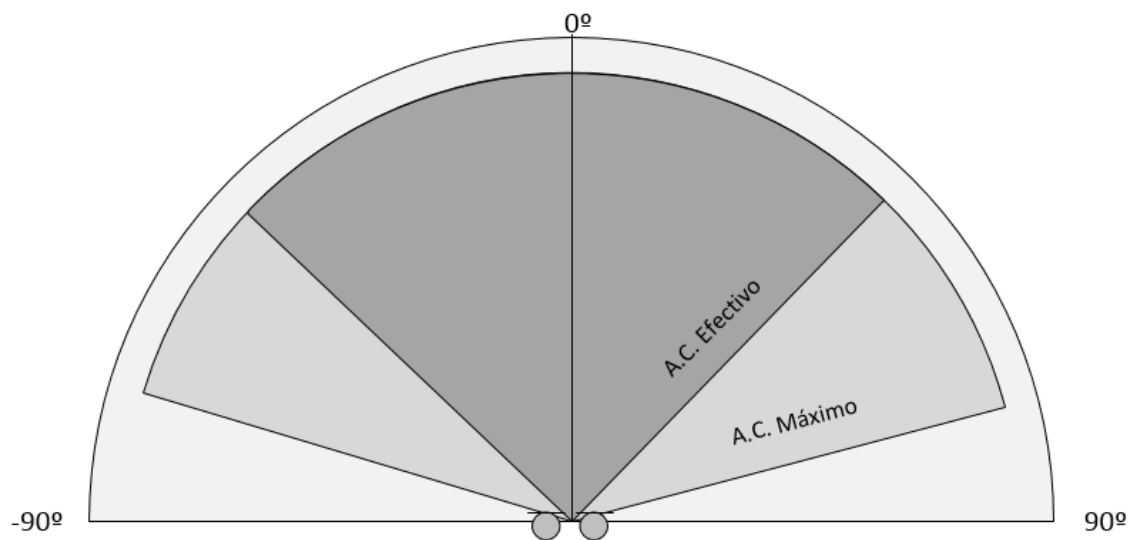


Figura 19. Esquema ilustrativo sobre los ángulos de cobertura.

- **Resolución del sistema de medida:** Se define como la diferencia mínima en grados que el sistema de medida es capaz de distinguir para una frecuencia de muestreo y distancia microfónica determinada.  
En el caso de nuestras medidas, será el número de ángulos distintos que el sistema es capaz de detectar, calculados de manera experimental.

- **Error del sistema:** Se define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de una medida [36]. Esta magnitud nos permitirá determinar la exactitud de las mediciones realizadas y por lo tanto la del sistema completo.

Se puede determinar en grados, para conocer la exactitud de nuestro sistema a la hora de localizar eventos sonoros, pero ya que el proyecto surge con la necesidad de diseñar una caja de intemperie para un sistema de detección de ruido de reversa basado en la estimación de la potencia acústica calculada a partir de la aproximación de la distancia existente entre los micrófonos y el evento sonoro. Se va a determinar el error de dicha aproximación en metros, comparando la distancia real entre la fuente y los micrófonos con la estimada a partir del ángulo proporcionado por el software. Esa distancia estimada se calculará con la ecuación 9, calculada a partir de relaciones trigonométricas calculadas a partir de la Figura 3

$$r = \frac{d}{\sin(\cos^{-1}(\cos(\phi)))} \quad (9)$$

- **Incertidumbre del sistema:** Debido a que se realizarán varias repeticiones de los diferentes ensayos, se podrá realizar una estimación de la incertidumbre del sistema siguiendo la metodología de la GUM [37] para calcularla. Se ha realizado un resumen de los conceptos de incertidumbre en el Anexo I.

#### 3.2.2. Ensayos en laboratorio

Se han hecho ensayos de laboratorio porque permiten un mayor control sobre las medidas, ya que se puede controlar las condiciones ambientales a conveniencia, y por ello se pueden conseguir mayor precisión en los cálculos. Estas pruebas se han realizado en el *Laboratorio de Acústica del Grupo I2A2*.

Estas medidas comprobarán la eficacia del sistema para localizar eventos sonoros a corta distancia, que si bien no son objetivo del proyecto, permitirán limitar las medidas en el exterior fijando una distancia microfónica óptima y decidir sobre que frecuencias de muestreo es más adecuado realizar las medidas en el exterior, además nos permitirán definir la cobertura horizontal máxima para la situación final.

La esquematización del ensayo propuesto se muestra en la Figura 20. Se va a optar por colocar la fuente alrededor de una semicircunferencia de dos metros de radio en vez de colocarlo en una recta – como se hará posteriormente-. Éste hecho nos permitirá evaluar la cobertura del sistema sin tener que hacer uso de grandes distancias en línea recta que nos generarían problemas derivados de difícil solución, como la necesidad de usar fuentes de ruido de gran potencia acústica que supondrían inconvenientes como las molestias generadas a la población durante las pruebas en exterior.

Se realizarán medidas en dos distancias de micrófonos, a 10 y 30 cm, siendo 30 cm la distancia máxima que se ha fijado para introducir los dos micrófonos en una misma caja de intemperie. Además se trabajará las siguientes frecuencias de muestreo: 50kHz, 48kHz, 44.1 kHz, 32kHz, 24 kHz y 16 kHz.

Por las características de la sala este ensayo tiene la limitación de que como indica la bibliografía [15], para que el sistema de medida funcione perfectamente la distancia de separación entre fuente y array microfónico debe ser mucho mayor que la distancia de separación entre los micrófonos, más de 10 veces. Esto podría provocar que los resultados fueran algo peores que los ensayos *in situ*.

### 3. METODOLOGÍA

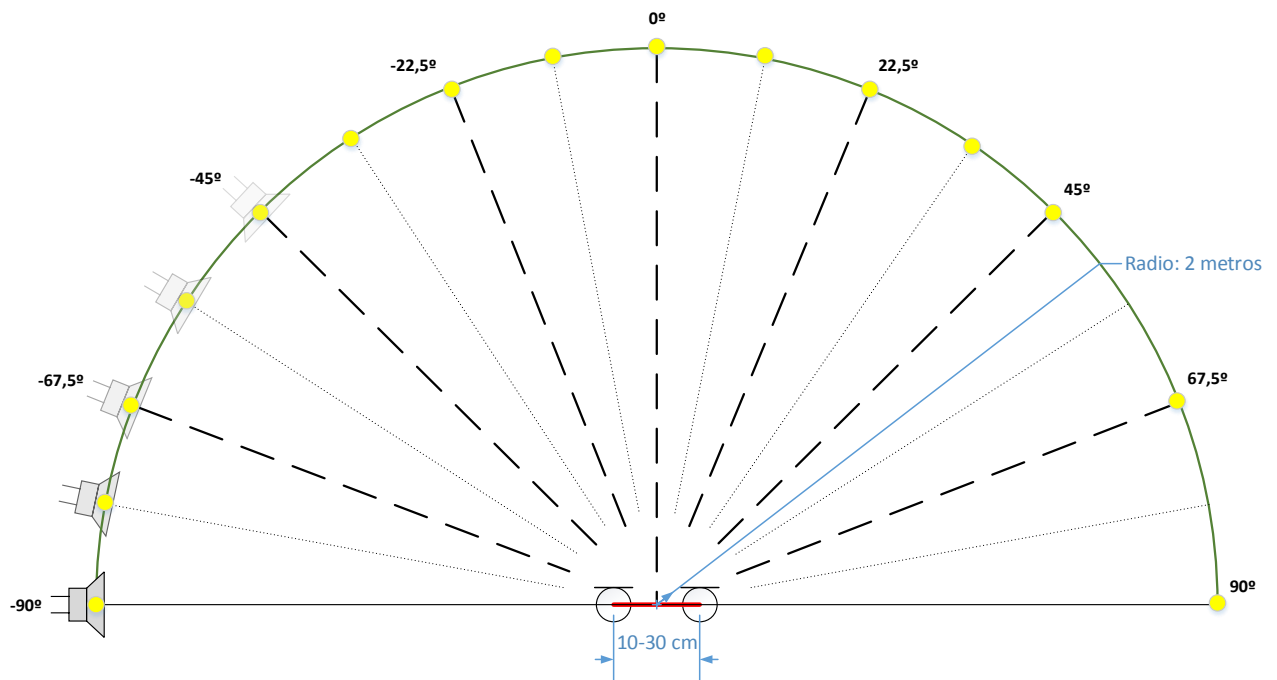


Figura 20. Esquema del ensayo realizado en el Laboratorio de Acústica

En la Figura 21 y la Figura 22 se muestran algunas imágenes del ensayo. En la primera se ve cómo se ha realizado la colocación de los puntos de medición alrededor de una semicircunferencia. En la imagen inferior se observa la colocación del sistema de medida en el laboratorio. El recinto ideal para la realización de los ensayos hubiera sido una cámara semianecoica, pero no haber realizado las medidas en una no ha generado problemas puesto que es el sonido directo el que principalmente marca el desfase, y por lo tanto la localización espacial. De todos modos, de manera preventiva, se colocaron paneles absorbentes acústicos en la parte trasera de los micrófonos por si en alguna de las posiciones se fuera a provocar alguna reflexión problemática.

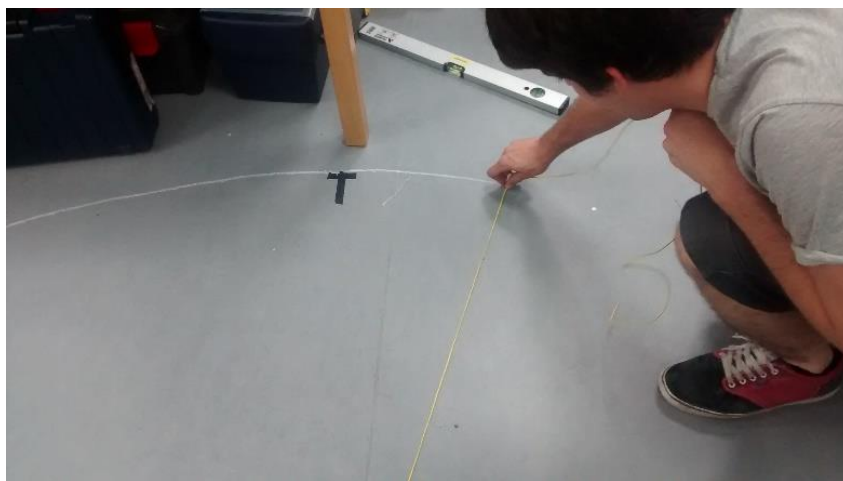


Figura 21. Colocación de los puntos de emisión de ruido en el laboratorio.





Figura 22. Fotografías del ensayo en el laboratorio

Con este montaje se realizarán dos tipos de ensayos:

- **Medidas en puntos discretos**

Se harán mediciones del sistema colocando el altavoz que emite ruido blanco en los puntos mostrados en la Figura 20. Estas medidas permitirán evaluar el error de predicción del sistema, puesto que se compararán los resultados obtenidos con el sistema de medida con los puntos reales desde dónde se están produciendo.

Estas medidas se realizarán con varias distancias microfónicas entre 10cm y 30cm, además de con distintas frecuencias de muestreo, que permitirán conocer a partir de que frecuencia de muestreo se obtienen resultados aceptables y cuál es la distancia microfónica óptima. Un resumen de las medidas que se han realizado con estas medidas se puede ver en la Tabla 5.

En primer lugar se hicieron mediciones con las frecuencias de muestreo de 50kHz, 48kHz y 44.1kHz para las tres distancias microfónicas, y tras realizar una inspección visual de los resultados que se mostrará en el capítulo 4 de esta memoria, se llegó a la conclusión de que 30 centímetros era la distancia microfónica óptima, por lo que se realizaron mayor número de repeticiones.

Tabla 5. Número de mediciones realizadas para las distintas distancias de micrófono y frecuencias de muestreo.

$d_{mic} \backslash f_m$	50 kHz	48 kHz	44.1 kHz	32 kHz	24 kHz	16 kHz
10 cm	1	1	1	-	-	-
20 cm	1	1	1	-	-	-
30 cm	6	6	6	2	2	1

- **Medidas en posiciones continuas**

Cuando el ángulo del evento sonoro está fuera de la cobertura horizontal máxima del sistema de medida, la herramienta software arroja como dato de salida *Not a Number*, esto es debido a que se produce una indeterminación en el cálculo del ángulo. Conociendo esto se realizarán medidas continuas de modo que se moverá el altavoz emisor de ruido manualmente con una velocidad reducida y uniforme desde la posición -90° hasta 90° siguiendo la semicircunferencia marcada en el suelo.

El análisis de los datos registrados por la herramienta permitirá conocer la resolución del sistema, ya que el altavoz pasará por todos los ángulos de la semicircunferencia y el software captará N puntos distintos en función de la distancia microfónica y la frecuencia de muestreo. Además se podrá conocer la cobertura horizontal máxima rápidamente comparando el ángulo captado mayor con el más pequeño.

En la Tabla 6 se muestran el número de medidas que se han realizado con esa metodología. Hay que señalar que también se han realizado medidas con el sistema microfónico de intemperie diseñado para establecer una comparación.

Tabla 6. Número de medidas en posiciones continuas realizadas para las distancias de micrófono y frecuencias de muestreo

$d_{mic}$ \ $f_m$	50 kHz	48 kHz	44.1 kHz
10 cm	1	1	1
30 cm	1	1	1

#### 3.2.3. Ensayos en exteriores

En vista a los objetivos marcados en este proyecto, se busca un funcionamiento correcto del sistema de medida en distancias del orden de los 20 metros debido al uso final que se le dará al prototipo de caja de intemperie. Estos ensayos tienen la misma filosofía que los anteriores, que es comprobar la exactitud del sistema de medida con y sin caja comparando la información en grados reportada del sistema, con los grados reales con los que llega el ruido. En este caso los ensayos se realizarán emitiendo ruido –con la bocina de un automóvil– en puntos discretos a lo largo de una recta. Con este ensayo se recrea una situación similar a la que se encuentra en la pista de un aeropuerto cuando se realiza la detección del ruido de reversa.

Debido a que las distancias van a ser mayores es necesario el diseño de pruebas para realizarlas en el exterior. Una de los retos del proyecto ha radicado en la búsqueda de emplazamientos adecuados que cumplan con los requisitos siguientes:

- **Extensión suficiente:** Para la realización de las pruebas diseñadas se necesita una pista de al menos 60 metros de largo por 15 metros de ancho. De este modo se podrán realizar medidas con posiciones suficientemente extremas para evaluar la caja en coberturas mayores.
- **Tráfico:** Por cuestiones de legislación vial y comodidad es necesario que la pista de ensayo sea privada o esté cortada al tráfico para no ocasionar problemas a otros conductores en el momento de ensayar.

### 3. METODOLOGÍA

- **Población:** Los emplazamientos del ensayo deben estar alejados de zonas habitadas para no ocasionar molestias a la población provocadas por la emisión de ruidos, además de este modo evitaremos problemas de ruido de fondo.

#### *Emplazamiento de los ensayos*

Se han encontrado dos emplazamientos que cumplan las características marcadas y por lo tanto se han realizado ensayos en ambas localizaciones. El primero de ellos se encuentra en el *Campus Sur* de la Universidad Politécnica de Madrid próximo al Instituto de Investigación del Automóvil (INSIA) como se muestra en la Figura 23. El segundo es una pista de maniobras de camiones para autoescuelas que se encuentra en el Polígono Industrial de Cabanillas-Marchamalo (Guadalajara), mostrado en la Figura 24.



Figura 23. Emplazamiento N°1 de los ensayos en exterior del TFM



Figura 24. Emplazamiento N°2 de los ensayos en exterior del TFM

El hecho de que dichos emplazamientos tengan dimensiones distintas nos permitirán realizar medidas en dos situaciones diferentes. En el emplazamiento N°1 se podrán realizar ensayos de precisión del sistema para posiciones más extremas, ya que la longitud de la pista es mayor, pero a menor distancia, por la anchura de carretera. En el emplazamiento N°2 se podrán realizar medidas en un menor ángulo de cobertura pero a mayor distancia, ensayando el sistema en una situación más próxima a la del uso final del kit de intemperie –una posición a 200 metros de la pista del aeropuerto de Madrid-Barajas-.

Se han realizado el siguiente tipo de ensayo a media distancia:

#### *Ensayo en puntos discretos*

Éstas medidas van a permitir conocer el nivel de precisión que tiene el sistema para detectar determinados ángulos en posiciones de fuente colocadas en frente del sistema. El ensayo realizado es similar al mostrado en la Figura 20, pero realizándose en línea recta. Los puntos de emisión de ruido y el posicionamiento del sistema de medida –medidos con GPS- de cada uno de los emplazamientos se muestran en los planos de la Figura 27 y Figura 28.

La realización de los ensayos seguirá el mismo procedimiento en los dos emplazamientos. En primer lugar se ha de colocar los puntos de medida utilizando balizas deportivas en línea recta, como se



### 3. METODOLOGÍA

muestra en la Figura 25B. Una vez hecho eso se colocan los micrófonos en una recta perpendicular aproximadamente a la mitad de la distancia de la línea anteriormente creada a partir de los conos, y se toman las posiciones con el GPS.



*Figura 25. A- Sistema de localización en funcionamiento en el emplazamiento N°2.  
B- Balizas para marcar las posiciones de emisión de ruido*



*Figura 26. Balizas colocadas en el emplazamiento N°1 en el Campus SUR de la UPM.*

### 3. METODOLOGÍA

Las medidas se realizaron con la ayuda de un técnico de modo que éste se encargó de generar el ruido haciendo uso del claxon del automóvil colocándose en cada uno de los puntos, tal y como se puede ver en la Figura 25A, mientras el otro técnico comprueba que los resultados ofrecidos por el software son coherentes y va apuntando incidencias, como la presencia de viento durante las medidas.

Las medidas a realizar con éste tipo de ensayo y sus repeticiones se muestran en la Tabla 7, esas medidas se repetirán en los dos emplazamientos, ya que el segundo nos va a dar mayor información acerca del comportamiento del sistema a distancias mayores, debido a que la distancia entre el sistema microfónico y la perpendicular en el primer emplazamiento es de 13.5 metros, y en el segundo asciende hasta los 31.5 m , aunque como se ha dicho anteriormente con una limitación en los ángulos a analizar-

Tabla 7. Número de series de medidas realizadas para cada frecuencia de muestreo y situación microfónica en cada uno de los emplazamientos elegidos

$f_m$ Situación	50 kHz	48 kHz	44.1 kHz	24 kHz
Sin sistema de intemperie	4	4	4	3
Con sistema de intemperie	4	4	4	3

Una vez finalizados los ensayos se realizaron comparaciones entre las medidas proporcionadas por el sistema de medida y los ángulos considerados reales, calculados en postprocesado a partir de los datos proporcionados por el GPS.



Figura 27. Mapa con la localización del emplazamiento número 1 en el Campus Sur. Generado con ArcGIS.





Figura 28. Mapa con la localización del emplazamiento número 2 Guadalajara. Generado con ArcGIS.

## 4. RESULTADOS

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos tras las mediciones realizadas con la metodología propuesta en el capítulo dos de este informe.

### 4.1. Resultados Laboratorio

En las Figura 30 y Figura 31 se muestran los resultados medios obtenidos en cada una de las posiciones en forma de gráfica, tras el procesado de la información en un entorno Matlab.

En dichas figuras se relaciona la información dada por el software desarrollado, en el eje Y, con los ángulos teóricos que debería dar el sistema, eje X. Para comprobar la eficacia del sistema se ha considerado que puede llegar a existir un error de  $\pm 2$  grados por las posibles imprecisiones a la hora de colocar el altavoz emisor en los distintos puntos, ya que como muestra el esquema de la Figura 29, considerando que en algunas de las posiciones se puede haber cometido un error en el posicionamiento de siete centímetros respecto el eje central del altavoz, realizando el cálculo trigonométrico mostrado se ve que el ángulo de diferencia será de dos grados hacia uno de los lados, y por lo tanto otros 2 grados hacia el otro. Esta limitación del sistema de medida nos permitirá evaluar la precisión del sistema, ya que si la posición mostrada por el sistema de medida está dentro de los márgenes de tolerancia, se podrá asegurar que el sistema está funcionando correctamente.

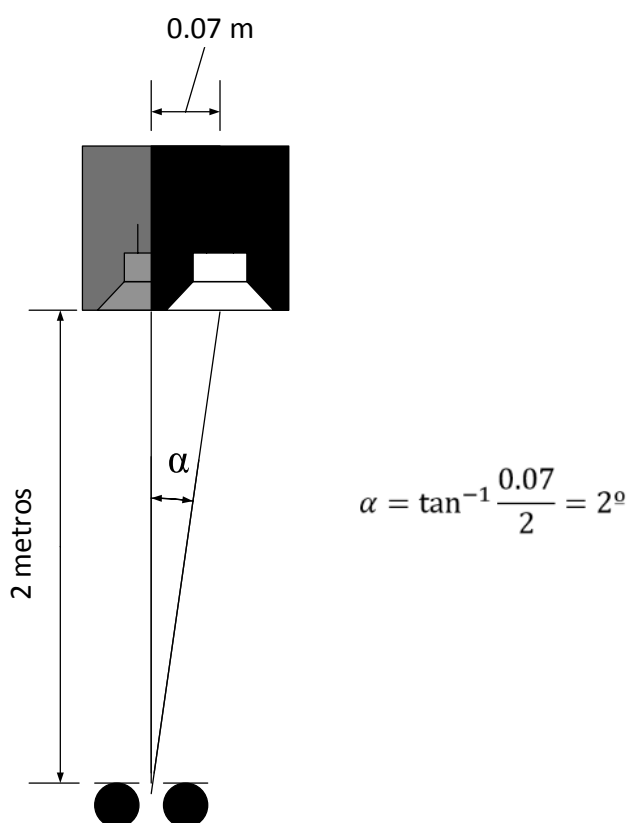


Figura 29. Estimación del error cometido a la hora de colocar el altavoz.

En la Figura 30 se observa de manera conjunta las posiciones medias de las medidas realizadas con las frecuencias de muestreo seleccionadas en el capítulo anterior. En una medida ideal existiría una coincidencia entre la posición del punto de emisión, correspondientes a los ángulos marcados como referencia en la metodología del ensayo, y la posición marcada por el sistema de medida. Cuanto más se aleje cada una de las medidas de la situación ideal se puede considerar peor desde punto de vista

#### 4. RESULTADOS

de la precisión, considerando la medida nula cuando ésta se sitúa fuera de los márgenes de tolerancia –marcados en gráfica como líneas discontinuas verdes–.

Con esa premisa, se observa que con ninguna de las frecuencias de muestreo seleccionadas el sistema es capaz de captar la localización en los ángulos extremos, 90 y -90 grados. También se puede ver que según va incrementándose el ángulo del evento sonoro y se va acercando al límite de la cobertura horizontal máxima (máximo ángulo que es capaz de detectar el sistema de localización) el sistema va cometiendo mayor error de predicción, como se puede distinguir de manera clara en los puntos de medida correspondientes a los realizados con una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz.

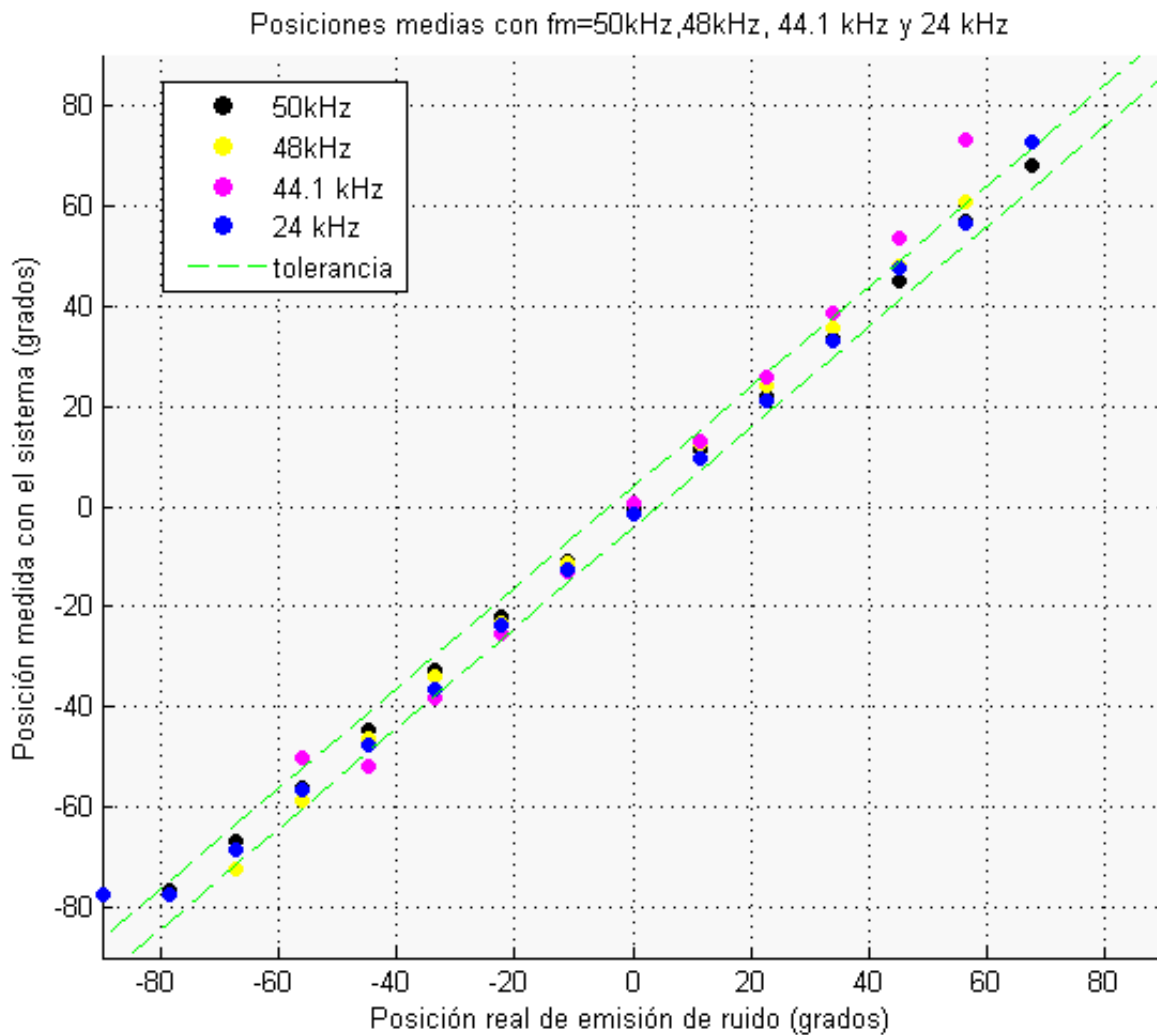


Figura 30. Resultados de las mediciones realizadas en el Laboratorio con el array microfónico sin sistema de intemperie.

En la figura Figura 31 se muestra una gráfica similar a la anterior, pero en esta ocasión con las medidas realizadas con el sistema de intemperie diseñado. Se puede observar que en todas las ocasiones el error de predicción que aparece en los ángulos extremos se acentúa respecto a las medidas anteriores. Esto es debido a la existencia de obstáculos para la onda acústica, ya que al estar los micrófonos en el interior de la caja (existe un hueco donde es colocado el material anti-lluvia), cuando incide la onda sobre el extremo de la caja se produce el fenómeno de la dispersión que provoca un funcionamiento errático del sistema a partir de ese ángulo incidente.



#### 4. RESULTADOS

Analizando la gráfica se observa que mientras que en la situación original el intervalo de ángulos en los que el sistema localizaba bien era de unos  $[-70\ 70]$  grados, con la colocación de la caja estos se reducen a unos  $[-50\ 50]$ , siendo este una cobertura suficiente para la aplicación final de la caja.

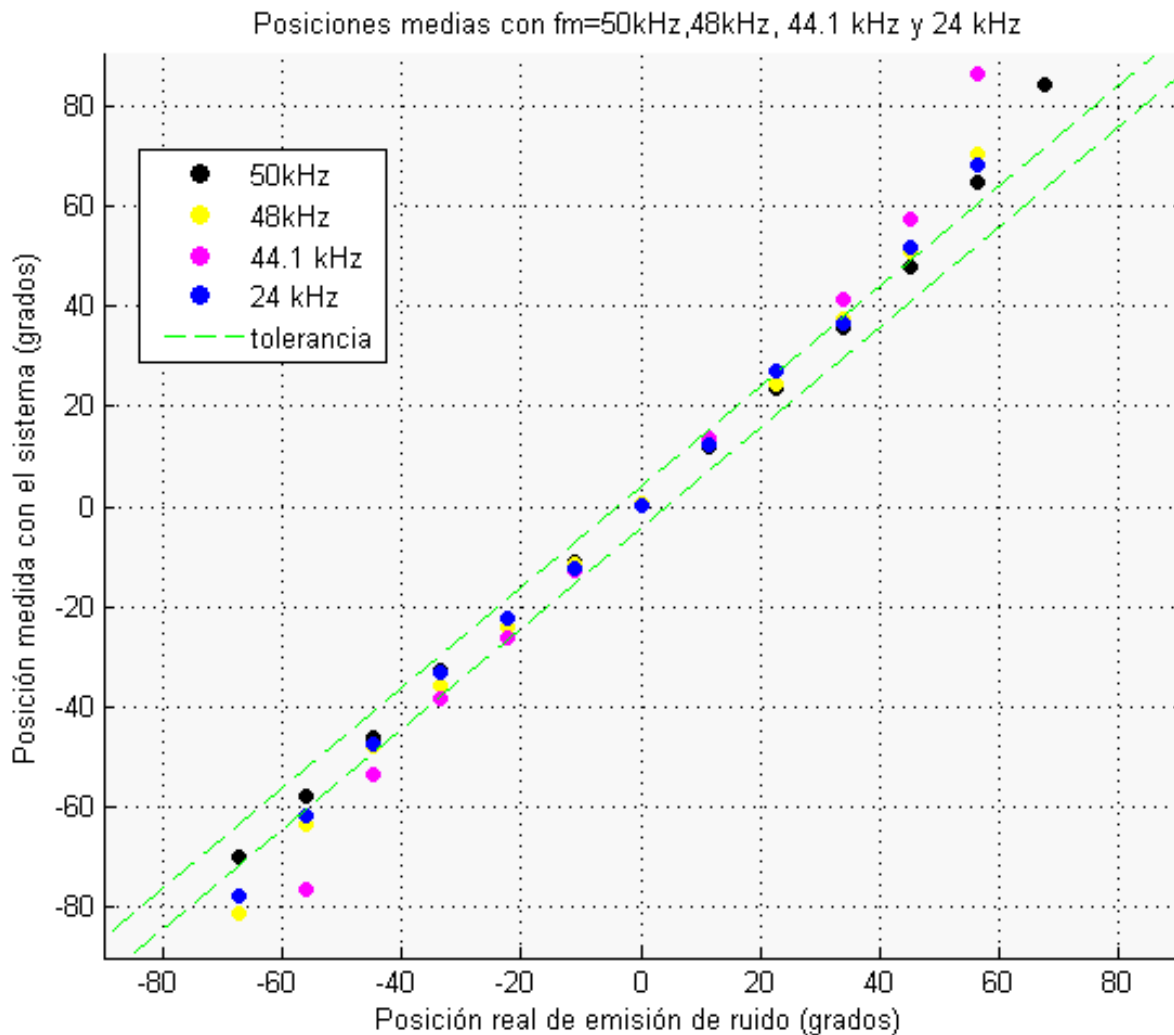


Figura 31. Resultados de las mediciones realizadas en el Laboratorio con el array microfónico sin sistema de intemperie.

Otra información obtenida con las medidas del laboratorio es el máximo y el mínimo ángulo detectado por el sistema a partir de la realización de los ensayos de medidas en posiciones continuas. A diferencia de las pruebas anteriores, éstas nos van a permitir definir cuál es el máximo ángulo que el sistema de medida es capaz de detectar. A partir de esta medida se determina el ángulo de cobertura horizontal máxima, mostrado en la Tabla 8, en la que se ve los ángulos extremos que el sistema es capaz de captar para cada una de las frecuencias de muestreos ensayadas y el efecto en la cobertura máxima cuando se coloca el array microfónico con el sistema de intemperie. Es importante recordar que este parámetro no es orientativo sobre la calidad del sistema, ya que aunque exista muy buena cobertura horizontal se puede cometer mucho error, como se observaba en las gráficas anteriormente mostradas.

#### 4. RESULTADOS

Tabla 8. Intervalo de ángulos de cobertura horizontal máxima.

Frecuencias de muestreo	Sin caja		Con caja	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
24 kHz	-77.58	77.58	-77.58	77.58
44.1 kHz	-81.30	86.51	-86.51	86.51
48 kHz	-81.3	81.3	-81.3	63.28 <sup>2</sup>
50 kHz	-71.62	81.3	-84.1	84.1

Aunque el ángulo de cobertura máximo fuera grande, y el error fuera pequeño, puede suceder que la resolución angular del sistema no sea adecuada para la aplicación debido a la poca precisión que va a conseguir.

Se calculará la resolución media, como la división entre el ángulo de cobertura horizontal máxima y el número de puntos distintos que es capaz de detectar el array. Ese número de puntos se ha obtenido procesando los datos de las medidas en posiciones continuas explicadas en el capítulo de metodología obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 9. Dónde se puede ver que a mayor frecuencia de muestreo, el sistema es capaz de distinguir mayor número de ángulos, consiguiendo de este modo una resolución angular media mayor.

Tabla 9. Número de ángulos distintos que el sistema en cada una de sus configuraciones es capaz de detectar.

	24kHz	44.1kHz	48kHz	50kHz
Sin caja	40	75	77	76
Con caja	48	75	77	85

#### 4.2. Modelo de incertidumbre de las medidas del GPS

Antes de mostrar los resultados obtenidos en los ensayos en exteriores se va a desarrollar el modelo de incertidumbre utilizado para validar las medidas proporcionadas por el sistema de localización sonora desarrollado.

En todo proceso de medida, el valor observado en la instrumentación no se puede considerar el valor real de ésta debido a distintos factores como la precisión del instrumento, la estabilidad que tiene en medidas continuadas, etc. Cuando se trabaja con un valor verdadero hay que ser consciente que es imposible conocerlo, aunque sea utilizado en multitud de ocasiones como valor real.

A partir de la *Guide of Uncertainty Measurement* (GUM), de la que se ha hecho un resumen accesible en el anexo I, se ha desarrollado un modelo de incertidumbre de baja complejidad para poder evaluar en qué posición se ha generado ruido en las medidas de exterior.

El modelo planteado parte de la siguiente base:

$$P_{TV}(x, y) = P_{mean}(x, y) + \delta_{inc} [m]$$

<sup>2</sup> Se desconoce el motivo de la disminución de cobertura en esta medida.

Donde,

- $P_{TV}(x, y)$  es el valor verdadero de la posición en la que se han realizado las medidas.
- $P_{mean}(x, y)$  es el valor medio de las distintas medidas realizadas con el GPS en el mismo punto, en el que  $x$  e  $y$  se corresponden a las coordenadas UTM (*easting*, *northing*).
- $\delta_{inc}$  es una componente de error asociada a la incertidumbre propia del instrumento de medida

Esa componente de error asociada al instrumento de medida ha de calcularse a partir de los distintos tipos de incertidumbre.

#### Incertidumbre tipo A

Es la incertidumbre asociada a los procesos de repetición en las medidas, ya que al realizar medidas de manera continuada no dan exactamente el mismo valor, si no que existe una variabilidad. Esta incertidumbre en el caso de coordenadas espaciales se subdividirá en dos aportaciones distintas:

- Aportación de incertidumbre de la coordenada  $x$  o de *easting*.

$$u_A(x) = \frac{P_{mean}(x)}{\sqrt{\sigma_{mean}(x)}} \quad [m] \quad (10)$$

Donde:

- $P_{mean}(x)$  es el valor medio de las coordenadas *easting* obtenidas de las medidas del GPS.
- $\sigma_{mean}(x)$  es la desviación estándar de la media de las coordenadas *easting*.

- Aportación de incertidumbre de la coordenada  $y$  o de *northing*.

$$u_A(y) = \frac{P_{mean}(y)}{\sqrt{\sigma_{mean}(y)}} \quad [m] \quad (11)$$

Donde:

- $P_{mean}(y)$  es el valor medio de las coordenadas *northing* obtenidas de las medidas del GPS.
- $\sigma_{mean}(y)$  es la desviación estándar de la media de las coordenadas *northing*.

Una vez calculada las aportaciones de cada una de las coordenadas a la incertidumbre tipo A, se combinan las dos haciendo la raíz de la suma cuadrática de ellas, como muestra la ecuación.

$$u_A(x, y) = \sqrt{u_A^2(x) + u_A^2(y)} \quad [m] \quad (12)$$

### Incertidumbre tipo B

La incertidumbre tipo B es la incertidumbre asociada a parámetros ya estudiados y por lo tanto está ya definida. En nuestro caso la única contribuyente a la incertidumbre tipo B es la precisión marcada por el GPS.

La precisión que nos aporta el GPS se traduce en que la posición medida por el GPS se encuentra dentro de una circunferencia de R metros de diámetro, es decir, una circunferencia de R/2 metros de radio.

Ese valor proporcionado por el GPS es un valor de incertidumbre expandida que se traduce en que existe un 95% de probabilidades en que la medida que se ha volcado del GPS esté dentro de esa circunferencia, incertidumbre expandida. Para poder realizar cálculos es necesario operar con la incertidumbre tipo B estándar, no expandida, por lo que:

$$u_B = \frac{R/2_e}{2} \quad [m] \quad (13)$$

### Incertidumbre total

Para saber la incertidumbre del sistema hay que combinar la incertidumbre tipo A con la incertidumbre tipo B anteriormente descrita con la ecuación siguiente:

$$u_c(x, y) = \sqrt{u_A^2(x, y) + u_B^2} \quad [m] \quad (14)$$

Si consideramos que existen infinitos grados de libertad, utilizando las ecuaciones del Anexo I se obtiene la incertidumbre expandida:

$$U_E(x, y) = k * u_c(x, y) = 2 * u_c(x, y) \quad [m] \quad (15)$$

Que será la utilizada para expresar el intervalo en el que se encontrará el valor verdadero medido con el GPS de la forma.

$$[P_{mean}(x, y) - U_E(x, y) \quad P_{mean}(x, y) + U_E(x, y)] \quad [m] \quad (16)$$

### 4.3. Resultados en exteriores

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en las medidas realizadas en el exterior. Estas medidas han sido procesadas en Matlab, extrayendo diagramas como los mostrados en la Figura 32, en los que a partir de las posiciones medias, medidas con el GPS, y la precisión proporcionada por éste, se han calculado los círculos rojos, correspondientes a la incertidumbre expandida de la medida del GPS, explicada en el apartado anterior.

#### 4. RESULTADOS

En Figura 32<sup>3</sup> se muestran los resultados de las medidas realizadas en el emplazamiento N° 1, en el Campus Sur de la UPM, para la frecuencia de muestreo de 50kHz para el sistema con caja de intemperie y sin ella. El eje X corresponde a las coordenadas de *easting* de la proyección UTM (*Universal Transverse Mercator*) y en el Y las correspondientes al *northing*, ambas medidas en metros. En la gráfica los puntos en rojo corresponden a las medidas realizadas sin la caja de intemperie y las de color verde a las medidas realizadas con el prototipo diseñado.

En este primer emplazamiento se puede observar que las medidas correspondientes a las posiciones etiquetadas del 2 al 9 son correctas, puesto que tanto las medidas realizadas sin caja y con ella están dentro de los márgenes de incertidumbre del GPS, por lo que se pueden considerar correctas. Sin embargo las medidas en las posiciones 1 y 10 salen con gran error, especialmente cuando se coloca el sistema de intemperie, ya que los puntos correspondientes a la posición 10 se encuentran en los márgenes de la 9. Especialmente destacable son las medidas emitiendo ruido en el punto 1 ya que debido al error que tienen están situadas muy lejos del punto real de emisión. Los resultados de las demás frecuencias de muestreo pueden verse en el Anexo II<sup>4</sup>.

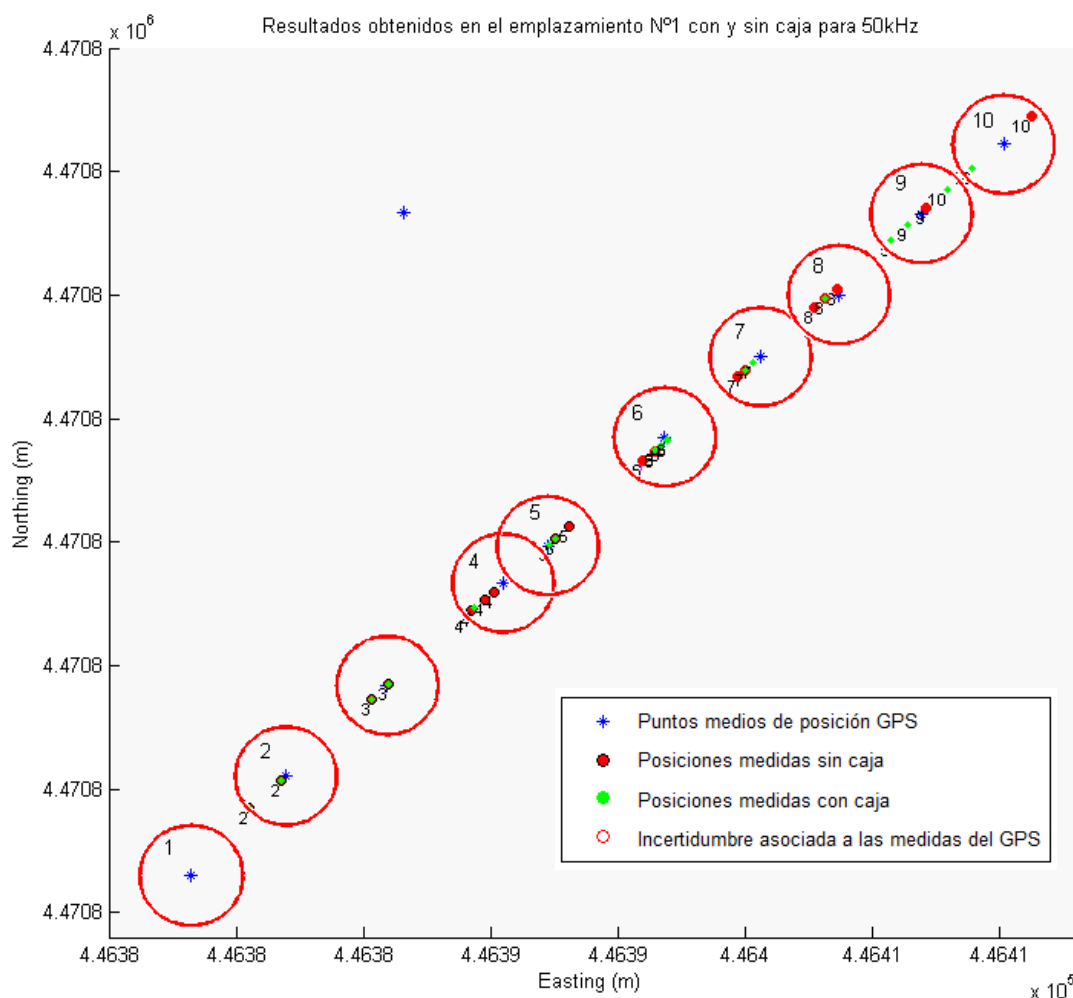


Figura 32. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 50kHz.

<sup>3</sup> En los anexos se añaden gráficos similares para todas las situaciones medidas.

<sup>4</sup> En el ANEXO I se realiza una explicación de los ensayos en el emplazamiento 2.

#### 4. RESULTADOS

Tabla 10. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo.

Id	Tolerancia negativa	Tolerancia positiva	Media de las medidas sin caja				Media de las medidas con caja			
			50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz	50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz
1	52,67	47,35	63,61	71,71	NaN	68,27	62,65	68,96	86,51	72,93
2	56,62	50,78	55,03	55,68	65,80	59,14	56,58	60,39	69,75	61,80
3	48,32	39,72	45,15	48,26	53,13	49,71	45,46	48,62	54,75	47,60
4	33,94	20,85	31,63	34,04	33,28	33,22	34,07	35,15	38,17	36,55
5	26,62	11,90	16,15	16,37	16,83	16,61	18,90	18,76	19,43	18,04
6	2,27	-14,24	-1,52	-2,66	-2,97	NaN	-4,59	-4,33	-5,21	-4,10
7	-17,81	-31,44	-21,46	-23,14	-23,78	-23,89	-22,64	-23,65	-25,21	-20,93
8	-30,93	-41,50	-35,67	-37,98	-43,40	-38,29	-35,67	-37,98	-43,40	-34,88
9	-43,33	-50,97	-48,00	-50,69	-56,63	-51,82	-45,46	-47,27	-51,67	-45,64
10	-51,18	-56,84	-56,57	-61,34	-68,37	-56,48	-51,04	-54,58	-64,62	-51,82

Tal y como se mostró en la ecuación 9, debido al posible futuro uso que se le vaya a dar a este tipo de sistema de intemperie en la detección del ruido de reversa, se ha calculado la distancia real existente entre los puntos de emisión de ruido y el array microfónico, a partir de las medidas realizadas con el GPS. Si un evento sonoro se produce en un ángulo  $\alpha$ , se puede calcular la distancia  $r$  existente entre la fuente y el sistema de detección. Cuando se realiza una estimación de la posición incorrecta, con un ángulo  $\beta$ , al calcular la distancia existente entre fuente y micrófonos se cometerá un error, que se acrecentará cada vez que se quieran detectar ángulos más extremos, como se esquematiza en la Figura 33. La importancia de esta distancia radica en que si se estima mal la estimación de la potencia sonora será incorrecta con consecuencias negativas en la detección del ruido de reversa, como se mostraba en la ecuación 1.

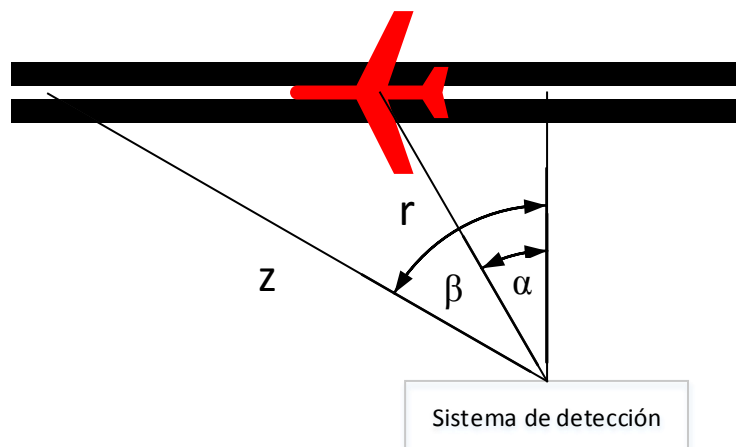


Figura 33. Cálculo erróneo de distancias por una mala predicción del ángulo de proveniencia.

En la Figura 34 se muestran el cálculo de esas distancias para el emplazamiento N°1. En color azul se muestran los márgenes de tolerancia que se han calculado a partir de los intervalos mostrados en la Tabla 10, si las distancias de los ángulos estimados se encuentran dentro de esos márgenes se podrá afirmar que el sistema funciona bien en esa posición y ángulo. Se observa que en puntos cercanos al

#### 4. RESULTADOS

sistema de medida el error existente en la estimación de la distancia es pequeño, debido a que en ángulos menores el error que se produce en su estimación va a ser menor y por lo tanto el error en la estimación en la distancia también lo será. Particularmente se observa que en las medidas realizadas con una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz se produce mucho error de distancia, por lo que de aquí en adelante esas medidas se descartarán. En las medidas sin caja se consigue realizar una estimación correcta entre los puntos 2 y 9, que se corresponde con un intervalo angular aproximado de  $[-55\ 50]$  grados. Al utilizar la caja de intemperie aumenta el error en la localización y por lo tanto en la estimación de la distancia pudiendo afirmar que se estima bien entre los puntos 3 y 9, correspondientes a un intervalo entre  $[-40\ 40]$  grados.

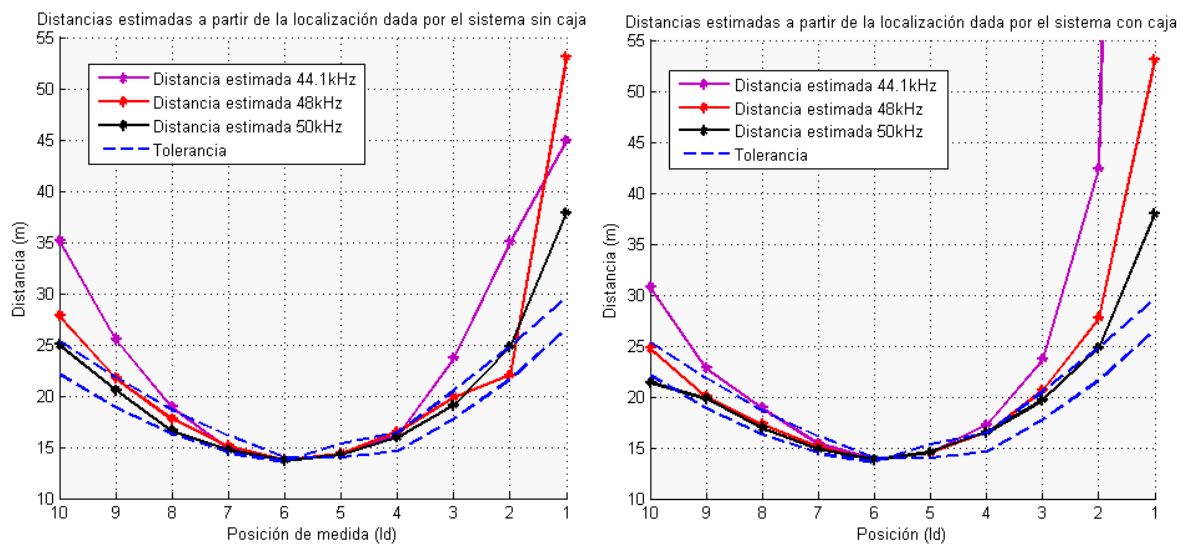


Figura 34. a- Distancia entre array y puntos para el sistema sin el kit de intemperie.  
b- Distancia entre el array y los puntos para el sistema con el kit de intemperie.

Esta información es útil únicamente para la situación en la que se ha medido, en la que existía una distancia entre la recta con los puntos y los micrófonos de 15 metros, lo interesante es ver el error en porcentaje cometido respecto a la distancia real, ya que esta información se puede extrapolar a la situación real de uso del sistema, en la que habrá una distancia entre fuente y sistema de medida aproximadamente 200 metros.

En la Figura 35 se pueden ver esas gráficas de error para cada una de las posiciones de medida, mostradas en el eje x y en el eje y el porcentaje de error, calculado como el aumento de distancia estimada que existe en cada posición de medida. En color azul se muestra una vez más la tolerancia que proponemos para evaluar el sistema, se ha calculado a partir de la tolerancia de la Figura 34 y está basado en la precisión que tiene el sistema GPS utilizado. De este modo se considerarán que la estimación de la distancia realizada no sufre un gran error cuando esté por debajo de la curva azul.

Con esa premisa podemos observar que en el sistema sin caja se produce muy bajo porcentaje de error en las posiciones centrales, menos del 2.5%, sin embargo cuando se emite ruido en las posiciones extremas, la 1 y la 10, se incrementa ese error de predicción en más del 15 %.

En las medidas con caja el error de estimación se incrementa especialmente a la frecuencia de 48kHz en la posición 2, mientras que en la 10 disminuye, lo que significa que el sistema de medida es poco

#### 4. RESULTADOS

fiable en esas posiciones. Con la caja de medida las posiciones en las que podemos verificar que se va a producir poco error en la estimación de la distancia, y por lo tanto en una futura estimación de potencia sonora para la detección de ruido de reversa son las encontradas entre , entre las posiciones 3 y 9.

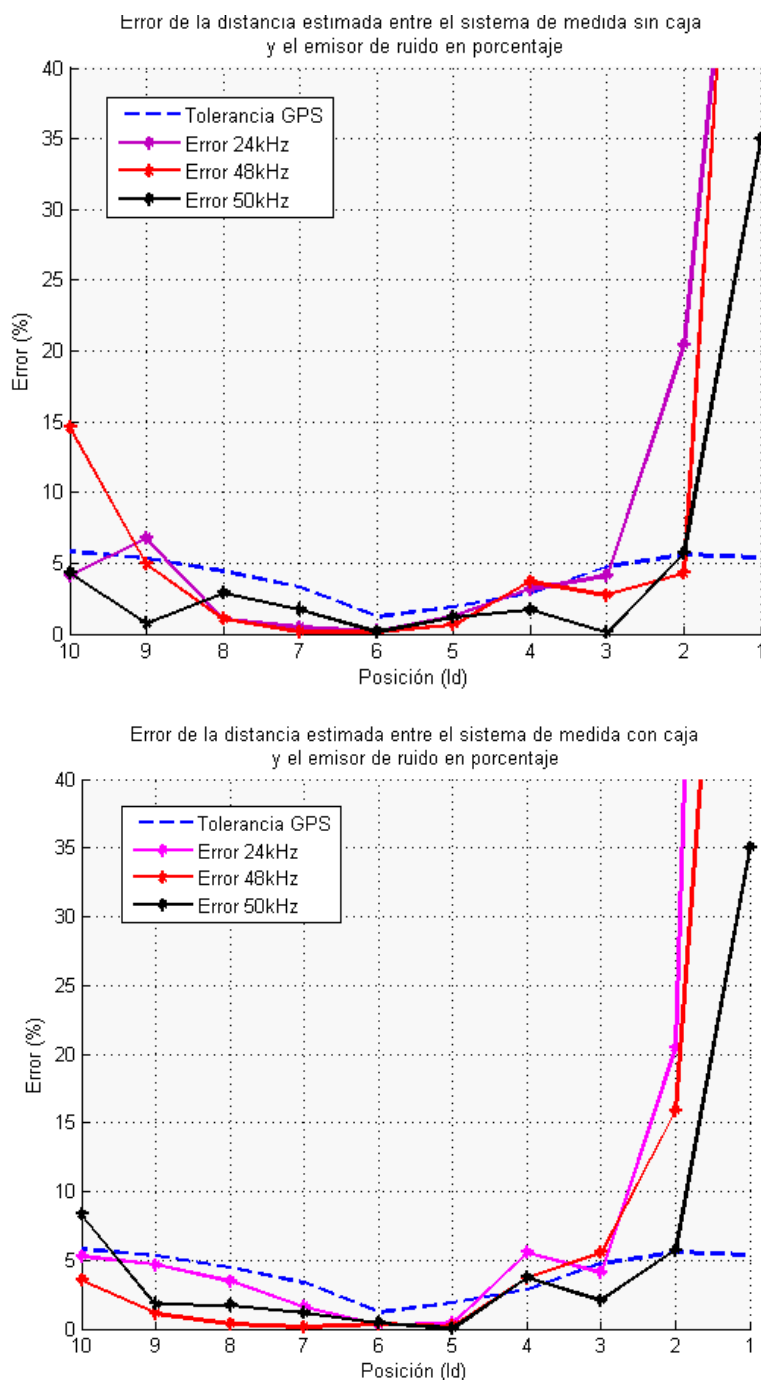


Figura 35. a- Error asociado a la distancia del array microfónico en porcentaje.  
b- Error asociado a la distancia del array microfónico con el sistema diseñado en porcentaje.



#### 4. RESULTADOS

Antes de finalizar realizando una valoración sobre el funcionamiento de la caja, se ha calculado como empeora la caja en la estimación de la distancia micrófonos-fuente en cada una de las frecuencias de muestreo, como se ve en la Figura 36, dónde se ve que el uso de la caja produce un gran incremento de error en los extremos, en torno al 10% y 30%, pero muy poco en las posiciones centrales, entre 9 y 3, que se asocian con el intervalo  $[-40\ 40]$  grados. Observando esta gráfica se puede concluir que el uso de la caja **no afecta a la localización en el plano horizontal** dentro del intervalo mencionando en casi ninguna de las frecuencias de muestreo, por lo que habrá que decidir el uso de una u otra en función de los parámetros de resolución.

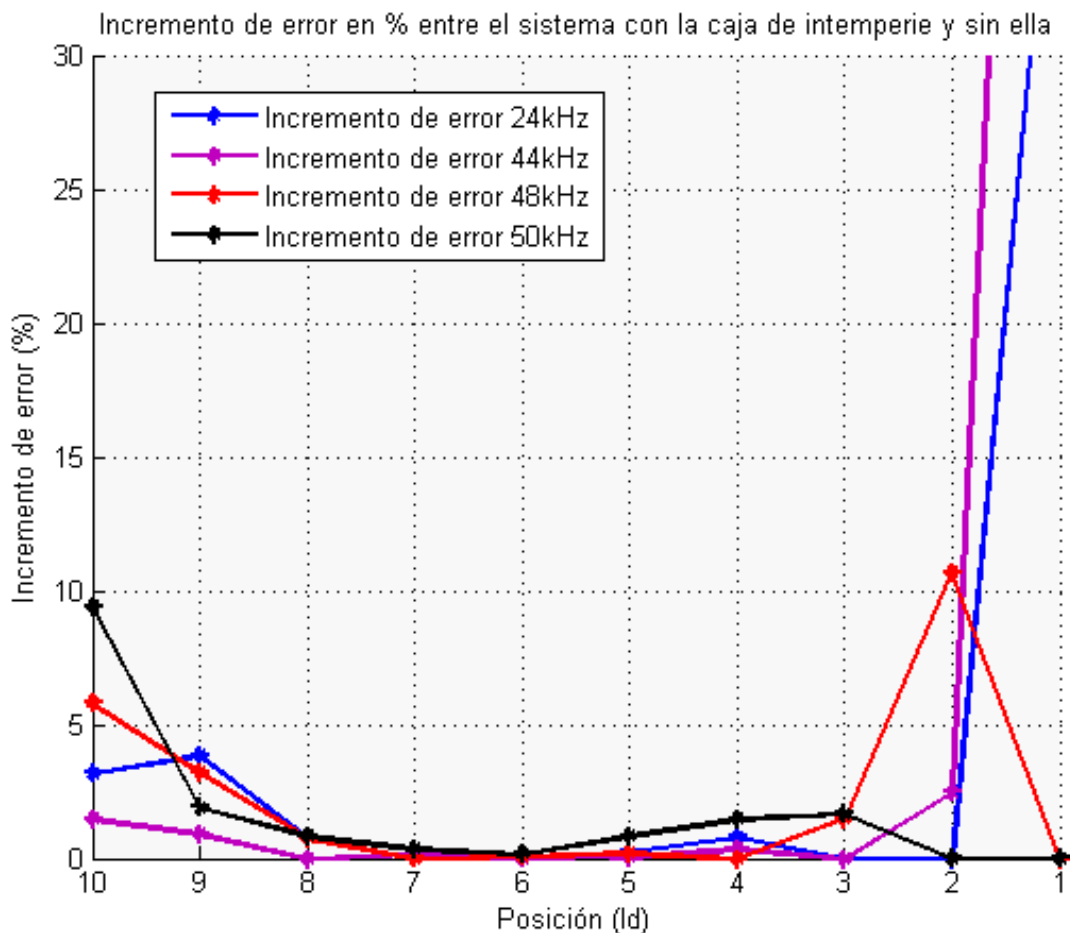


Figura 36. Incremento de error por el uso de la caja.

Por lo tanto se concluye este apartado eligiendo la frecuencia de muestreo óptima para realizar la localización:

Debido al número de puntos calculados en la Tabla 9, y el intervalo de cobertura máximo medido en el laboratorio, se obtiene unas resoluciones angulares medias como las mostradas en la Tabla 11, en la que se observa que según aumenta la frecuencia de muestreo el sistema es más sensible angularmente. Por ese motivo, a pesar de los buenos resultados obtenidos con la frecuencia de 24 kHz, las frecuencias de muestreo a las que sería conveniente trabajar son 48kHz y 50kHz.

#### 4. RESULTADOS

Tabla 11. Resolución angular media obtenida a partir de las medidas en el laboratorio.

Resolución (grados)	24kHz	44.1kHz	48kHz	50kHz
Sin caja	3.88	2.23	2.11	2.01
Con caja	3.23	2.30	1.88	1.98

Desgraciadamente la frecuencia de muestreo no siempre puede ser elegida por el usuario, si no que vienen dadas por el conversor analógico digital de un sistema de adquisición. De este modo se elegirá una frecuencia u otra en función del sistema de adquisición de datos:

- **48kHz:** Será la utilizada cuando se trabaje con tarjetas de adquisición de datos de bajo-medio coste, en las que la configuración de adquisición viene determinada por las frecuencias que típicamente se utilizan en el ámbito comercial como 24kHz, 48kHz, 96kHz o 192kHz.
- **50kHz:** Será la utilizada si el sistema con el que se vaya a medir en una DAQ profesional, como es la que se ha utilizado en este trabajo.

### 5. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha realizado un análisis sobre los actuales usos que tiene la localización sonora, así como algunos de los métodos de cálculo más comunes en el procesado de la señal acústica para saber su proveniencia. Además se ha realizado un análisis de las soluciones comerciales existentes para la utilización de instrumentación acústica en intemperie así como un pequeño resumen de la norma IEC 60529 para certificar esa resistencia.

Posteriormente, se ha hablado sobre el diseño de sistema microfónico de intemperie adoptado, definiendo los requisitos a cumplir y explicando las soluciones elegidas así como el montaje realizado describiendo los materiales utilizados y su función dentro del sistema

Una vez mostrado el diseño de kit de intemperie, se ha establecido un marco metodológico para la caracterización de un sistema de localización sonora combinando mediciones de laboratorio, en las que se ha podido definir con exactitud las características de localización del sistema, con mediciones en el exterior, para verificar el correcto funcionamiento de la localización en un entorno real.

Al margen de la resistencia a la intemperie de este sistema, con el trabajo realizado se pretendía estudiar el comportamiento de un sistema de localización de eventos sonoros en el plano horizontal cuando se utiliza un sistema de intemperie diseñado exclusivamente para este fin. Para ello se ha desarrollado una serie de experimentos que han permitido caracterizar el efecto de éste *kit* para estudios posteriores centrados en la detección del ruido de reversa

En lo relativo al estudio del arte se han llegado a algunas conclusiones:

- Aunque existen muchas publicaciones que utilizan la localización sonora, existen pocas investigaciones que hagan uso de ella como herramienta para calcular otros parámetros, más allá de la propia proveniencia del sonido.
- A pesar del uso de sistemas de intemperie en entornos aeroportuarios para detección de distintos tipos de ruido, no se han realizado estudios del efecto de las envolventes utilizadas en los resultados finales.
- No existen estudios sobre el efecto del viento en la localización sonora horizontal, esto supone el impedimento de realizar mediciones utilizando este sistema al no poder realizar correcciones fiables.

Desde el punto de vista del análisis de los resultados para el cumplimiento de los objetivos, se extraen las siguientes conclusiones:

- Respecto al diseño del sistema de medida se ha comprobado, tras estudiar otras posibilidades que el cálculo de la localización sonora por el método de la correlación cruzada es el más apropiado para la aplicación final del sistema de intemperie por su facilidad de implementación, su rápido procesado y por el bajo coste en instrumentación asociada, si se compara con el coste asociado al método de intensidad en el que se necesitan sondas, de un precio mayor que un micrófono, capaces de medir este parámetro

## 5. CONCLUSIONES

---

- A la hora de localizar los sonidos, por motivos desconocidos ciertas frecuencias de muestreo funcionan con mucho más error de lo que debieran, como es el caso de 44.1kHz.
- A la vista de algunas mediciones realizadas es necesario contar con un soporte microfónico que garantice que ambos transductores están colocados de manera simétrica y exactamente en el mismo plano.
- Tras realizar medidas con el sistema de intemperie se ha comprobado que un diseño de caja en las que las cápsulas microfónicas están introducidas dentro de un panel de madera no afecta de gran forma en la localización sonora horizontal, ya que únicamente disminuye el ángulo de cobertura efectivo diez grados en cada dirección.
- Aunque en la literatura sí que se menciona el efecto del viento en la localización sonora, debido a la experiencia de los ensayos en el emplazamiento N°2 se ha comprobado que con altas distancias y con ruidos de prueba con contenido mayoritario de medias y altas frecuencias la localización se ve muy afectada por el viento. Sin existir posibilidad de corregirlo por la carencia de investigaciones sobre esta índole
- Los sistemas de localización sonora aumentan su ángulo de cobertura horizontal efectivo cuanto mayor es la distancia entre los micrófonos y aumenta la resolución del sistema cuanto mayor es la frecuencia de muestreo, por lo que siempre es preferible trabajar a la mayor frecuencia de muestreo posible del sistema, si lo que se necesita es resolución.
- El efecto de la caja de intemperie es casi nulo en un margen amplio de ángulos, aunque sí que es destacable el error que se produce en los ángulos extremos.

Para concluir este trabajo, se presentan algunas aportaciones y proyectos de futuro respecto al tema tratado en este informe:

- La metodología propuesta asienta unas bases que pueden ser utilizadas para evaluar sistemas de localización sonora tanto en cortas como en medias distancias.
- Aunque se ha realizado exclusivamente un estudio sobre el efecto en la localización sonora, sería interesante realizar como afecta la caja de intemperie diseñada en el nivel de presión sonora captado por los micrófonos, ya que si el efecto es mínimo o cuantificable para hacer correcciones se puede utilizar la caja diseñada tanto como sistema de localización como sistema de medida de ruido de aeronaves en el aterrizaje, y en la misma caja de intemperie realizar todo el procesado de detección del ruido de reversa.

## 5. CONCLUSIONES

---

- Debido a que el diseño realizado es un prototipo ha sido realizado en madera. Si finalmente se utilizara este diseño en pruebas en el entorno real - un aeropuerto- durante largos periodos de tiempo, sería conveniente la construcción de la estructura en plástico, para asegurar al 100% que no exista ningún tipo de filtración hacia el interior de la caja, ya que aunque la madera ha sido tratada para soportar el agua, a largo plazo terminaría por absorberla.
- Sería interesante seguir desarrollando un sistema de detección de ruido de reversa, utilizando las mínimas soluciones comerciales o propietarias posibles, de forma que la adquisición de datos se realice con mini-PCs de bajo coste para realizar pruebas conjuntas con el diseño de intemperie mostrado en este trabajo. Esos PCs de muy bajo coste – 30€- ,como *Raspberry Pi* o Beaglebone, permiten tanto adquirir la señal acústica a través de entradas de micrófono, como procesarla y almacenarla.
- El siguiente paso para continuar con este proyecto sería el montaje de este prototipo con materiales plásticos, y realizar las pruebas de resistencia al agua y polvo para poder asignarle un código IP. Una vez hecho eso sería interesante volver a realizar algunas pruebas acústicas con micrófonos de bajo coste, de tipo electret, para ver si se podría abaratar aún más el desarrollo del sistema de detección.

## 5. CONCLUSIONES

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Asensio, G. Moschioni, M. Ruiz, M. Tarabini, and M. Recuero, "Implementation of a thrust reverse noise detection system for airports," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 19, pp. 42–47, Mar. 2013.
- [2] Boeing, "Airports with Noise and Emissions Restrictions," 2011. [Online]. Available: <http://www.boeing.com/boeing/commercial/noise/list.page>. [Accessed: 01-Sep-2014].
- [3] C. Asensio Rivera, M. Ruiz Gonzalez, G. De Arcas Castro, M. Recuero López, and J. M. López Navarro, "Procedimiento y sistema de detección de la activación de la reversa en el aterrizaje de una aeronave," 2396662012.
- [4] E. Mumolo, M. Nolic, and G. Vercelli, "Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics," vol. 42, pp. 69–88, 2003.
- [5] S. Hwang, Y. Park, and Y. Park, "Sound direction estimation using an artificial ear for robots," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 59, no. 3–4, pp. 208–217, Mar. 2011.
- [6] S. Lee, Y. Park, and J.-S. Choi, "Estimation of multiple sound source directions using artificial robot ears," *Appl. Acoust.*, vol. 77, pp. 49–58, Mar. 2014.
- [7] L. Gerosa, M. Tagliasacchi, F. Antonacci, and I. Politecnico, "Scream and Gunshot Detection and Localization for Audio-Surveillance Systems \*," in *Advance Video and Signal Based Surveillance*, 2007, pp. 21–26.
- [8] A. Severdaks, M. Liepins, and C. Science, "Vehicle Counting and Motion Direction Detection Using Microphone Array," no. 2010, pp. 89–92, 2013.
- [9] R. Peral-Orts, E. Velasco-Sánchez, N. Campillo-Davó, and H. Campello-Vicente, "Technical Notes: Using Microphone Arrays to Detect Moving Vehicle Velocity," *Arch. Acoust.*, vol. 38, no. 3, pp. 407–415, Jan. 2013.
- [10] M. A. Pallas, J. Lelong, and R. Chatagnon, "Characterisation of tram noise emission and contribution of the noise sources," *Appl. Acoust.*, vol. 72, no. 7, pp. 437–450, Jun. 2011.
- [11] R. C. Ramachandran, G. Raman, and R. P. Dougherty, "Wind turbine noise measurement using a compact microphone array with advanced deconvolution algorithms," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 14, pp. 3058–3080, Jul. 2014.
- [12] C. Asensio Rivera, "Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos," Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [13] K. Rasmussen, "Calculation methods for the physical properties of air used in the calibration of microphones," Technical University Of Denmark, Lyngby, Denmark, 1997.
- [14] D. R. Raichel, *The Science and Applications Of Acoustics*, Second Edi. Springer, 2006, p. 663.
- [15] J. Valin, J. Rouat, and L. Dominic, "Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot."

- 
- [16] M. R. Bai, J.-G. Ih, and J. Benesty, *Acoustic Array Systems. Theory, Implementation and Application*, First Edit. Singapore: Wiley & Sons Singapore Pte.Ltd, 2013, p. 526.
  - [17] O. . Bjor, J. Enger, and B. Winsvold, "Sound intensity for identification of aircraft noise," *Internoise Proc.*, vol. Internatio, 2001.
  - [18] F. Jacobsen, "Note nº31262 - Sound intensity and its measurement and applications," no. 31262. DTU, Lyngby, Denmark, p. 40, 2011.
  - [19] G. Moschioni, B. Saggin, and M. Tarabini, "The use of sound intensity for the determination of the acoustic trajectory of aircrafts," *19th Int. Congr. Acoust.*, p. 5, 2007.
  - [20] G. Moschioni, B. Saggin, and M. Tarabini, "Sound Source Identification Using Coherence- and Intensity-Based Methods," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 6, pp. 2478–2485, 2007.
  - [21] "DIRECTIVE 2002/49/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL." 2002.
  - [22] Ministerio de la presidencia, "Real Decreto 1367/2007," *Boletín Oficial del Estado*, vol. 254. pp. 42952–42973, 2007.
  - [23] M. M. P. S. SA, "Noise pollution: non-auditory effects on health," *Brit Med Bull*, vol. 68, pp. 243–257, 2003.
  - [24] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, "Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health," *Environ. Int.*, vol. 36, no. 5, pp. 492–498, 2010.
  - [25] P. Tassi, O. Rohmer, S. Schimchowitsch, A. Eschenlauer, A. Bonnefond, F. Margiocchi, F. Poisson, and A. Muzet, "Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age," *Environ. Int.*, vol. 36, no. 7, pp. 683–689, 2010.
  - [26] D. A. Black, J. A. Black, T. Issarayangyun, and S. E. Samuels, "Aircraft noise exposure and resident's stress and hypertension: A public health perspective for airport environmental management," *J. Air Transp. Manag.*, vol. 13, no. 5, pp. 264–276, 2007.
  - [27] C. Ribeiro, D. Ecotièrre, P. Cellard, and C. Rosin, "Uncertainties of the frequency response of wet microphone windscreens," *Appl. Acoust.*, vol. 78, pp. 11–18, Apr. 2014.
  - [28] Bruel & Kjaer, "Outdoor Microphone Kit - UA-1404." Bruel & Kjaer, Naerum, p. 8, 2009.
  - [29] Norsonic, "Outdoor Microphones Nor1216-Nor1217," vol. 140. Norsonic, Lierskogen, p. 4, 2014.
  - [30] Svantek, "SA 203 - Outdoor microphone kit for SVANTEK SLM, Short User Guide," no. September. SVANTEK, p. 16, 2008.
  - [31] 01dB-Metravib, "Especificaciones Técnicas Blue Solo/VES21/UME21." 01dB-Metravib, Limonest Cedex, p. 2, 2014.
  - [32] International Electrotechnical Commision, "CEI/IEC 60529:2001 'Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)'," vol. 1250. Geneva, p. 50, 2001.
-



- [33] UNE, "UNE 20324:93 - 'Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP)'." AENOR, Madrid, p. 54, 1993.
- [34] Wood Solutions. Design and build., "Medium Density Fibreboard (MDF)," 2014. [Online]. Available: <http://www.woodsolutions.com.au/Wood-Product-Categories/Medium-Density-Fibreboard-MDF>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [35] Maderas Elvira, "Características MDF," 2014. [Online]. Available: <http://www.maderaselvira.es/productos4.php?MDF>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [36] "International vocabulary of basic and general terms in metrology ( VIM )," no. Dguide 99999, 2004.
- [37] JCGM, "JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement." 2008.

## ANEXO I. MÉTODO CLÁSICO DE DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRE

En la mayoría de las situaciones, el mesurando de una medida acústica no se mide de una forma inmediata, si no que se determina a partir de otro número de magnitudes por medio de una relación como la de la ecuación 17.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (17)$$

Las magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_n$  pueden ser tanto como otros mensurandos dependientes de otras magnitudes, magnitudes conocidas y determinadas matemáticamente o medidas de las cuales no se conoce su valor real y por tanto se tratarán como variables aleatorias, siendo estas últimas el caso más común.

Las ventajas de tomar estas magnitudes como variables aleatorias es que éstas se asocian a una distribución de probabilidad, de forma que pueden tomar un valor aleatorio entre un intervalo de valores.

La estimación del mesurando  $Y$ , se puede obtener utilizando la ecuación 18 con variables de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , siendo éstas las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , tal y como se muestra en la expresión 17. Además la estimación del mesurando  $y$ , se podría calcular a partir de la media aritmética de  $i$  cálculos independientes de  $Y$ , como se ve en la ecuación 19.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (18)$$

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{i} \sum_{n=1}^i Y_n \quad (19)$$

La desviación típica asociada a la estimación de salida “ $y$ ” será la **incertidumbre típica combinada**, que se determina a partir de las desviaciones típicas de cada una de las variables de entrada, llamadas **incertidumbres típicas**.

$$u_c^2 = u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2 \quad (20)$$

Dependiendo de la naturaleza de las magnitudes de entrada existirán dos tipos de evaluaciones, la evaluación tipo A y la evaluación tipo B.

### *Evaluación tipo A.*

Este tipo de evaluación es utilizada cuando se realiza un número de observaciones independientes entre sí bajo las mismas condiciones de medida para una de las magnitudes de entrada  $X_i$ .

Suponiendo que esa magnitud de entrada  $X_i$  estimada a partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes es la magnitud  $Q^5$ . El valor estimado de la magnitud “ $q$ ” será el promedio de los valores medidos en cada una de las observaciones, definido en la ecuación 21.

---

<sup>5</sup> Las magnitudes se expresan con letras mayúsculas mientras que las estimaciones estadísticas de una magnitud en letras minúsculas.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (21)$$

La incertidumbre de medida asociada al valor estimado  $q$  se pueden evaluar por uno de los siguientes métodos:

- A partir de la **desviación típica experimental**, calculada a partir de la expresión 22:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (22)$$

Donde la mejor estimación de la varianza de la media aritmética  $q$  es la varianza experimental de la media aritmética que viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (23)$$

La incertidumbre típica asociada a la entrada  $q$  es la desviación típica experimental de la media.

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (24)$$

Cuando el número de repeticiones es pequeño ( $n < 10$ ) la incertidumbre calculada con este método suele no ser fiable. Por lo que en esos casos es recomendable el segundo método.

- Cuando estamos ante una medición bien diseñada y bajo control estadístico, puede existir una estimación de la varianza debida a un conjunto previo de resultados. Estando en ese caso, el valor de la estimación de la magnitud de entrada  $Q$ , también se calcularía mediante la media aritmética de un número pequeño de observaciones, y la varianza de la media aritmética podrá calcularse utilizando la expresión 25 y posteriormente se calcularía la incertidumbre, definida en la ecuación 24.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (25)$$

#### *Evaluación tipo B.*

Para obtener la estimación de la incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  no obtenida a partir de observaciones repetidas, la incertidumbre típica asociada se establece mediante un estudio científico basado en la posible variabilidad de dicha magnitud. El conjunto de la información sobre esas magnitudes puede comprender:

- Resultados de mediciones anteriores.
- Experiencia o conocimientos sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados.
- Especificaciones del fabricante.
- Datos suministrados por certificados de calibración.
- Incertidumbres asignadas a valores de referencia procedentes de libros y manuales.

Cuando no existe un conocimiento o experiencia sobre el comportamiento de la magnitud de entrada  $X_i$  y solo se conocen los límites de variabilidad de dicha magnitud, la distribución que se ha de utilizar preferiblemente es la rectangular, ya que en esta distribución todos los valores entre los límites establecidos pueden suceder con la misma probabilidad. En cambio, si además del intervalo se conoce la existencia de una zona de valores que es más probable que ocurran se ha de utilizar una distribución normal. En ambos caso, la incertidumbre típica será calculada a partir del valor de la desviación típica de la función de distribución que se ha elegido para modelizar los resultados de las observaciones de la magnitud de entrada.

#### Cálculo de la incertidumbre típica combinada

En este sub-apartado se va a tratar el cálculo de la incertidumbre típica combinada cuando cada una de las magnitudes de entrada son independientes entre sí.

La incertidumbre típica combinada es la incertidumbre típica correspondiente a la estimación del mensurando Y, denotado como se ha visto anteriormente por  $y$ . Esta incertidumbre se corresponderá a la composición de las incertidumbres típicas calculadas de cada una de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . La incertidumbre típica combinada se calculará como en la expresión 26, donde cada valor de  $u_i(y)$  corresponde a la contribución a la incertidumbre típica combinada de cada una de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_i$ .

$$u_c = \sqrt{\sum_{j=1}^N u_j^2(y)} \quad (26)$$

En la ecuación anterior la magnitud  $u_i(y)$  se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$u_j^2(y) = c_j^2 * u^2(y) \quad (27)$$

En la que el valor de  $u^2(y)$  se ha calculado mediante uno de los métodos de evaluación de incertidumbre vistos anteriormente y  $c_j^2$  se corresponde con el coeficiente de sensibilidad asociada a la estimación de una magnitud de entrada  $X_i$ .

El coeficiente de sensibilidad describe como varía la estimación de salida  $y$ , en función de las variaciones en los valores de las estimaciones de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Estos coeficientes pueden ser calculados utilizando la ecuación 28 o utilizando métodos empíricos, midiendo la variación de Y producida por una variación de una magnitud de entrada X dada, y manteniendo constantes las demás.

$$c_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} = \left. \frac{\partial f}{\partial x_j} \right|_{x_1, x_2, \dots, x_N} \quad (28)$$

En el caso de que las magnitudes de entrada no fueran independientes entre sí el método explicado no tendría validez, y se tendría que calcular mediante otros métodos que no se tratarán en este documento.

#### Cálculo de la incertidumbre expandida

Aunque la incertidumbre combinada puede ser utilizada universalmente para expresar la incertidumbre de un resultado de medida, en ciertas aplicaciones, como por ejemplo en acústica, es

necesario dar una medida de la incertidumbre que defina alrededor del resultado de medida un intervalo de confianza en el que se puedan encontrar la gran mayoría de los posibles valores de fluctuación del mensurando

Esta expresión de la incertidumbre es llamada *incertidumbre expandida*, está representada por la letra  $U$  y se calcula multiplicando la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U = k * u_c(y) \quad (29)$$

El factor de cobertura generalmente corresponde a un intervalo con un nivel de confianza determinado (generalmente del 95%) según una **distribución *t* de Student**, en la que se obtiene el valor de  $k$  a partir de los *grados efectivos de libertad* calculados a partir de la expresión 30 de *Weich-Satterthwaite*, de forma que a mayor grados de libertad la estimación de la incertidumbre será más fiable, por acercarse en mayor medida al nivel de confianza requerido.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (30)$$

Debe considerarse de que el hecho de multiplicar el valor de la incertidumbre combinada por una constante no añade información nueva a la incertidumbre, sino que sólo cambia la forma de presentar la información disponible. Aunque también tiene que tenerse en cuenta que en muchos de los casos la información relativa al nivel de confianza será impreciso, ya que el conocimiento sobre la distribución estadística de la incertidumbre combinada es limitado.

Al final el resultado de la incertidumbre deberá expresarse con la forma  $Y = y \pm U$  o en forma de intervalo como  $[y-U, y+U]$ , en ambos casos con un nivel de confianza del 95%.

## ANEXO II. MEDIDA EN EL EMPLAZAMIENTO N°2

En los ensayos del emplazamiento N°2 se han realizado medidas con menos cobertura horizontal, pero una distancia mayor, ya que mientras que los anteriores ensayos existía una distancia entre el array y la línea de puntos de emisión de ruido de 15m, en este caso hay 31.5 metros. Los resultados para la frecuencia de muestreo de 50kHz se muestra en la Figura 37, en la que los puntos en rojo se corresponden con las medidas sin caja de intemperie y los puntos en verdes con la caja de intemperie colocada.

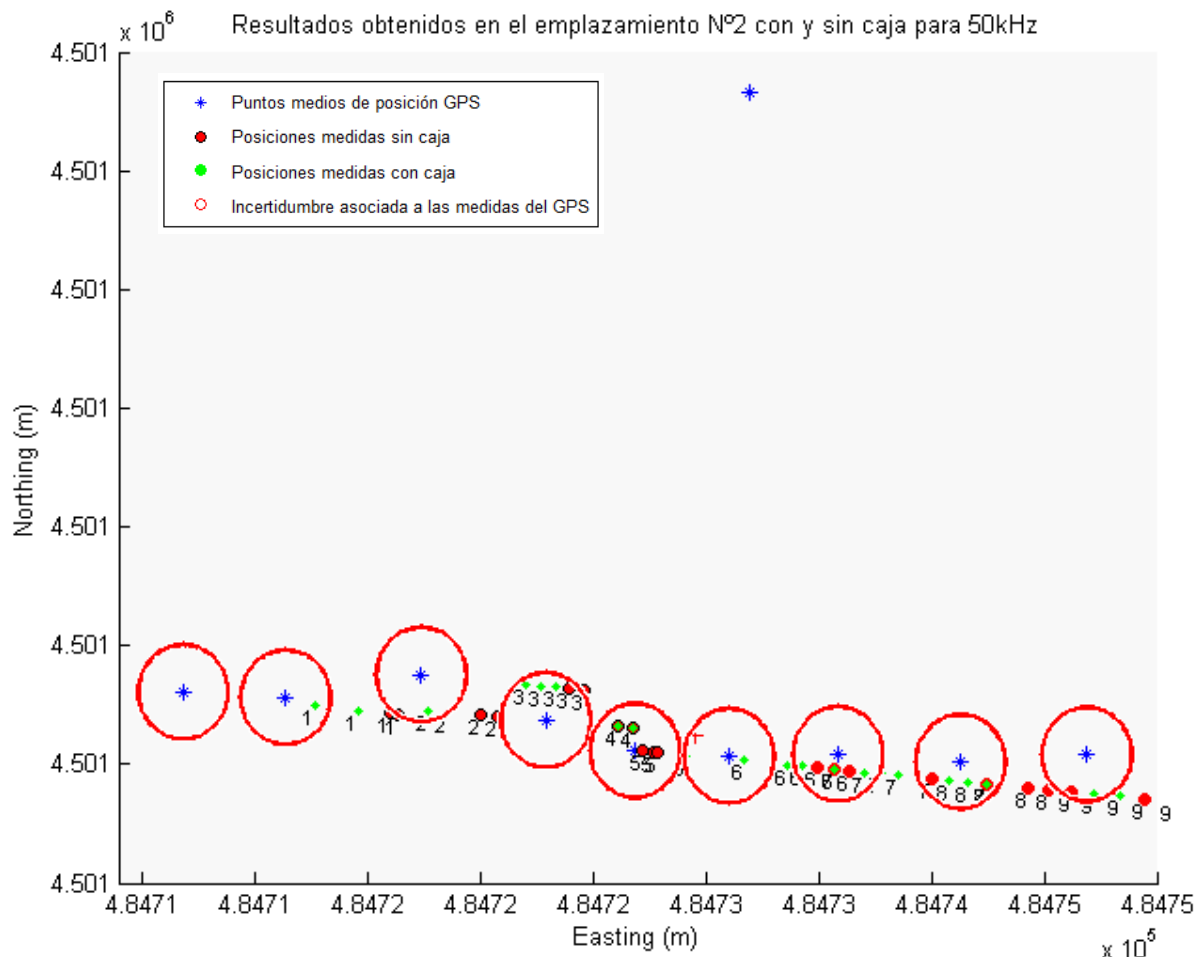


Figura 37. Esquema de resultados obtenidos para el emplazamiento N°2 en Guadalajara para una frecuencia de muestreo de 50kHz.

Observando la figura, puede comprobarse que los puntos medidos están fuera de las tolerancias marcadas por la incertidumbre del GPS. A priori no debería ocurrir puesto que tanto las medidas de laboratorio, como las medidas en el emplazamiento uno muestran que en el rango de ángulos que nos movemos el sistema funciona correctamente.

Si además observamos la Tabla 12, en la que la columna *Id* indica la etiqueta con la que se identifica cada uno de los puntos de medida en el emplazamiento N°2, las columnas *Tolerancia negativa* y *positiva* marcan los intervalos angulares entre los que se tiene que encontrar una medida para considerarse correcta, calculados a partir de la incertidumbre asociada al GPS. En las demás celdas se muestra el ángulo medio calculado a partir de las cuatro medidas realizadas en cada uno de los puntos. Si la celda tiene fondo rojo, significa que la medida está fuera del intervalo, si es de color verde significa

que está dentro y por lo tanto se puede considerar aceptada y si está en color anaranjado significa que está próximo al intervalo.

Tabla 12. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo

Id	Tolerancia negativa	Tolerancia positiva	Sin Caja				Con Caja			
			50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz	50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz
1	41,55	36,55	25,22	27,67	27,54	26,90	29,96	31,92	35,14	34,89
2	36,65	30,83	18,90	19,23	21,01	20,93	23,11	25,13	26,98	26,90
3	29,13	21,85	12,10	12,61	14,76	15,18	16,15	16,15	16,15	16,15
4	17,72	9,73	6,34	6,61	5,20	6,84	6,78	7,07	8,19	9,59
5	9,32	1,18	-3,71	-0,23	-2,23	-1,36	-0,65	-1,59	-1,23	0,00
6	0,87	-7,32	-12,54	-14,49	-14,26	-10,98	-9,43	-10,75	-9,71	-9,59
7	-9,09	-17,03	-22,89	-29,22	-25,89	-23,88	-15,71	-18,04	-17,86	-13,78
8	-19,85	-26,95	-28,70	-32,45	-35,69	-31,61	-23,59	-25,15	-28,66	-23,88
9	-30,18	-36,29	-36,48	-45,37	-52,58	-49,70	-33,55	-34,64	-37,53	-33,21

En la tabla la gran mayoría de las celdas está coloreada de rojo, algo difícil de comprender por lo anteriormente explicado, por lo que se establecen dos posibles hipótesis del motivo de estos resultados:

- **Mala orientación del array microfónico:** En el momento de la colocación del array microfónico se puede haber orientado el sistema ligeramente inclinado sobre la perpendicular, produciendo un cambio en los ángulos como mostraba en la Figura 37
- **Presencia de viento:** Aunque en el momento de las mediciones se comprobó con un anemómetro la ausencia de viento, al aumentar la distancia respecto las medidas anteriores y el hecho de que el sonido del claxon tiene mayoritariamente alta frecuencia, el aumento de la atenuación combinada con posibles ráfagas de viento en el punto de emisión puede haber provocado localización erráticas.

En el caso de que las medidas salgan mal orientadas por el efecto de un mal posicionamiento del array, puede ser corregido. En esta situación, como no se conoce el posible cambio en la orientación del array, se van a corregir las medidas sumando a cada uno de los ángulos el error medio calculado de su serie.

El error medio se va a calcular restando el valor del ángulo de la posición de medida, con el ángulo medio calculado a partir de los datos del programa, en cada uno de los puntos. Esas diferencias se sumarán y se dividirán posteriormente entre 18 ( 9 puntos de medida por la mitad que es el máximo error que se puede conseguir.

Una vez eso se ha obtenido la información expresada en la Tabla 13:

## ANEXO II

*Tabla 13. Intervalos de aceptación de las medidas junto a las medidas medias realizadas con el sistema de intemperie y sin éste a distintas frecuencias de muestreo, con los grados corregidos.*

Id	Tolerancia negativa	Ángulo de posición de medida	Tolerancia positiva	Sin Caja				Con Caja			
				50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz	50kHz	48kHz	44.1kHz	24kHz
1	41,55	39,14	36,55	30,32	32,78	32,65	32,01	35,06	37,03	40,25	40,00
2	36,65	33,84	30,83	24,01	24,34	26,11	26,04	28,21	30,24	32,09	32,01
3	29,13	25,60	21,85	17,20	17,72	19,87	20,29	21,25	21,25	21,25	21,25
4	17,72	13,79	9,73	11,45	11,71	10,31	11,95	11,89	12,17	13,30	14,70
5	9,32	5,28	1,18	1,40	4,88	2,88	3,75	4,46	3,52	3,87	5,11
6	0,87	-3,24	-7,32	-7,44	-9,38	-9,15	-5,87	-4,32	-5,65	-4,60	-4,48
7	-9,09	-13,13	-17,03	-17,78	-24,11	-20,78	-18,77	-10,60	-12,93	-12,75	-8,67
8	-19,85	-23,49	-26,95	-23,59	-27,34	-30,59	-26,50	-18,48	-20,04	-23,55	-18,77
9	-30,18	-33,34	-36,29	-37,09	-40,27	-47,48	-44,59	-28,44	-29,53	-32,42	-28,10
-	ERROR MEDIO		5,11	5,56	5,92	5,12	2,85	3,02	2,94	2,08	5,11

Viendo los datos de la Tabla 13, se comprueba que un mal posicionamiento del sistema no ha sido el causante del mal funcionamiento de éste, ya que aunque hay medidas que salen bien, como las realizadas con caja a 48 y 44.1 kHz, todas las demás siguen estando mal. Esto significa que no solo una posible mala colocación de la caja es la que ha provocado el error en la medida, ya probablemente por la presencia de viento, la correlación entre las señales captadas por el micrófono ha disminuido, provocando más error en la predicción.





## ANEXO III. GRÁFICAS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EMPLAZAMIENTO N° 1

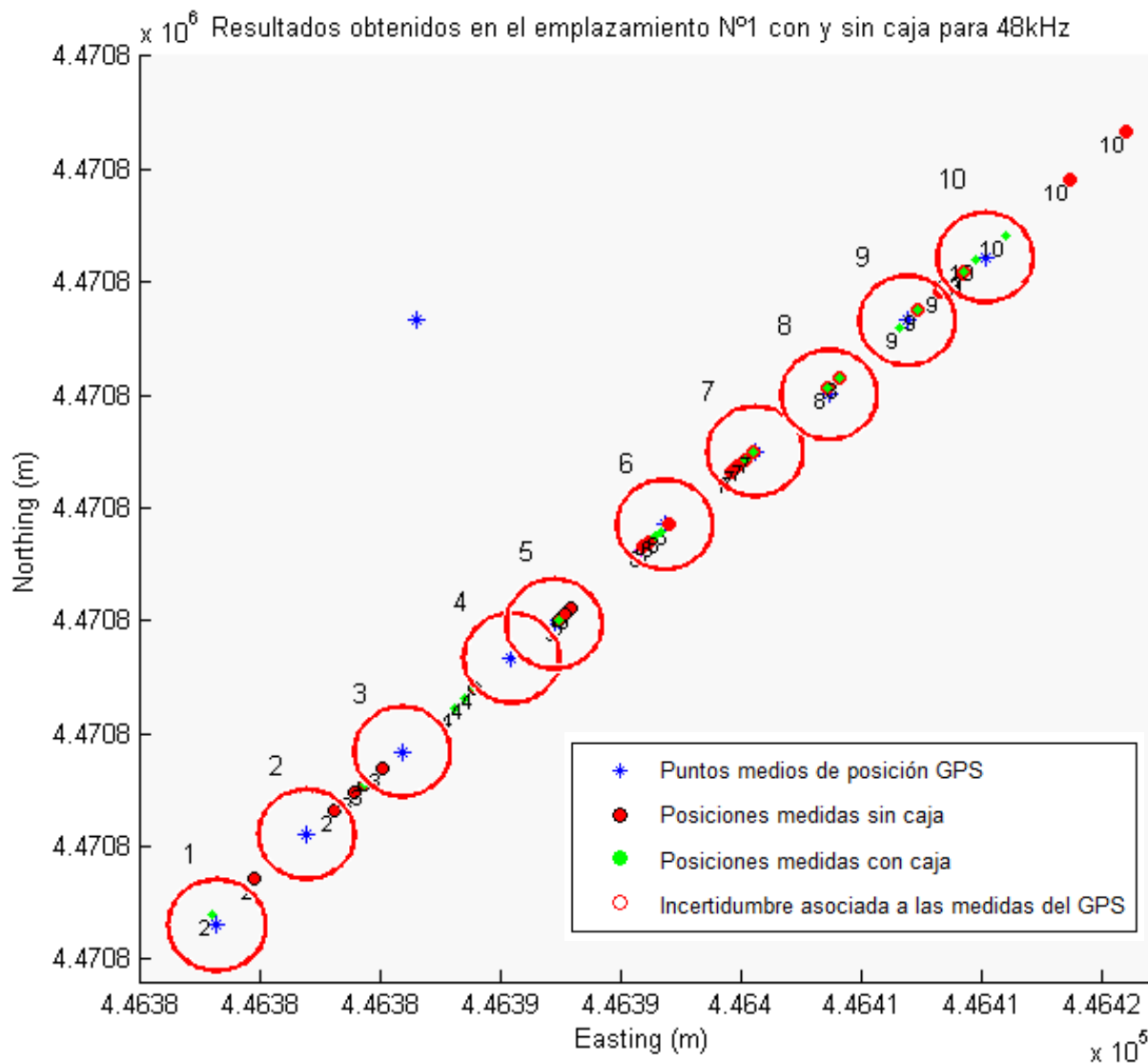


Figura 38. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 48KHz

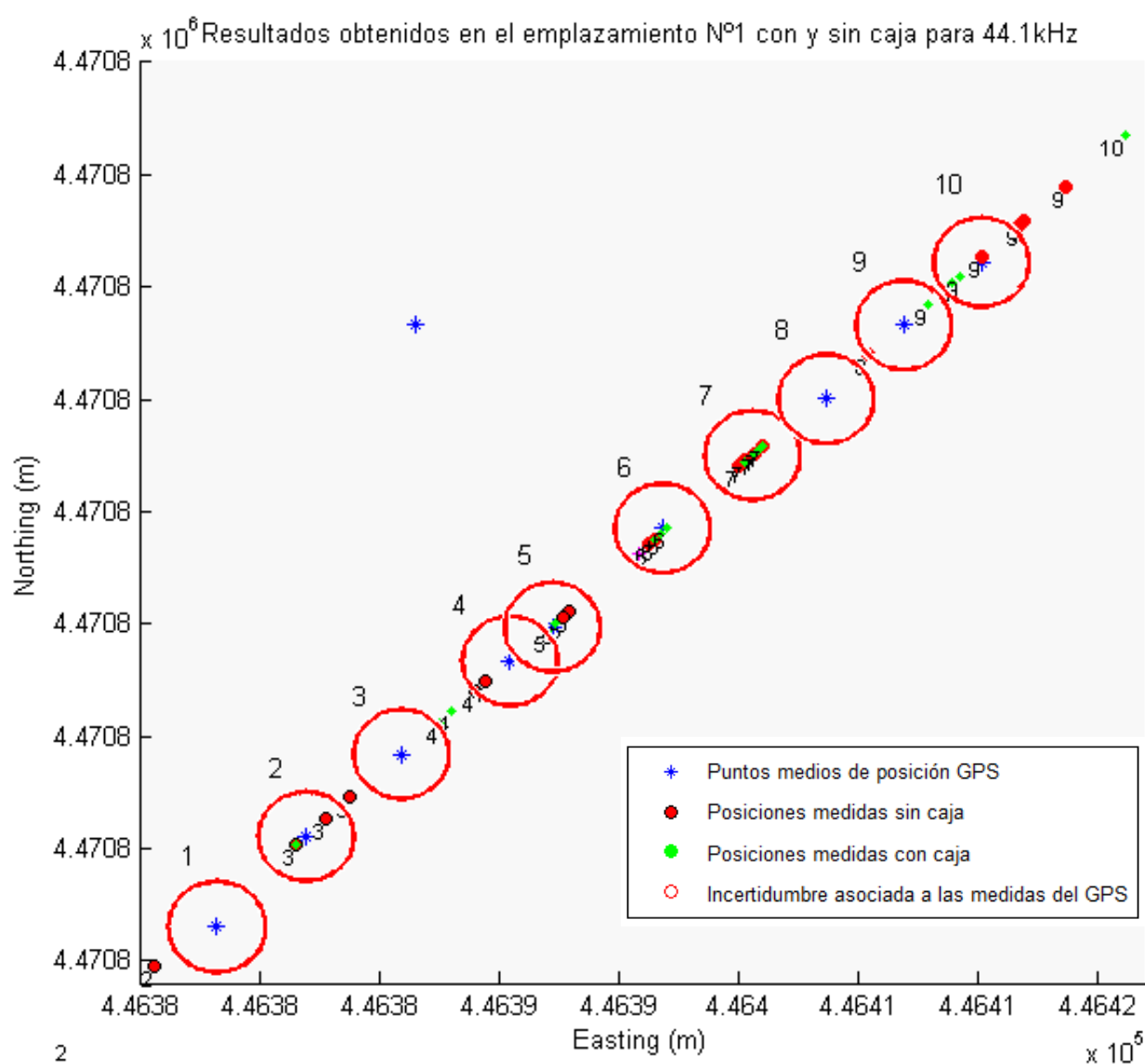


Figura 39. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz

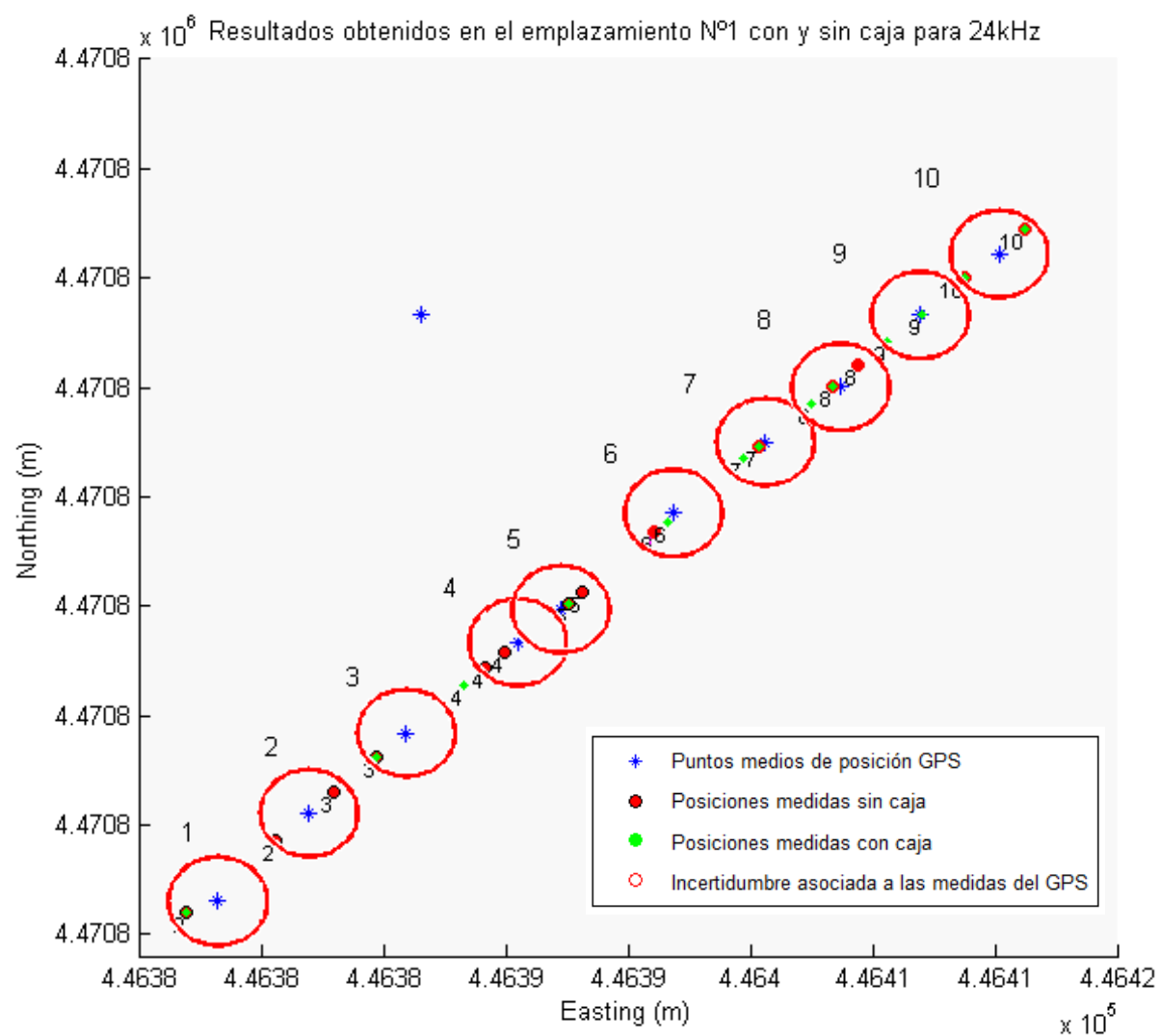


Figura 40. Esquemas de resultados obtenidos para el emplazamiento N°1 en el Campus Sur para una frecuencia de muestreo de 24kHz